

# **UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID**

## **FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS**

**Máster en Nuevas Tecnologías Electrónicas y Fotónicas**



## **TRABAJO FIN DE MÁSTER**

**Montaje y calibración de un sistema de pulverización multicátodo**

**Daniel Caudevilla Gutiérrez**

Directores:

Dr. Germán González Díaz

Dr. David Pastor Pastor

Departamento de Estructura de la Materia, Física Térmica y Electrónica

Curso académico 2017/2018

Convocatoria de Junio

## Abstract

We will present in this work the design and assembling of a radiofrequency multicathode sputtering system. The system is water refrigerated and its vacuum system is able to reach vacuum in the range  $10^{-7}$  mbar. It is designed for deposition and growth of thin metallic films for ohmic contacts on n- and p-type silicon. The system has been calibrated to use with three different cathodes, which all of them are assembled in the same chamber. The sample holder can be orientated in different positions for facing the targets and also to a blind position for cleaning processes. The targets used in the system are titanium, aluminum and tungsten. To perform the system calibration we have prepared different samples by lithography and we performed profilometry measurements to know the thickness of the deposited material.

**Key words:** Multicathod radiofrequency sputtering system, multicathode, contact profilometry measurements, photolithography and ohmic contacts on silicon.

En este trabajo se detalla el diseño, fabricación y montaje de un sistema de pulverización multicátodo por radiofrecuencia. El sistema está refrigerado por agua y alcanza vacíos del orden de  $10^{-7}$  mbar. El sistema está diseñado para depositar y crecer láminas delgadas metálicas contactos óhmicos sobre silicio dopado tipo n y tipo p. El sistema ha sido calibrado para tres blancos diferentes, los cuales se encuentran en la misma cámara. El portamuestras puede orientarse hacia cualquiera de los blancos o en una cuarta posición ciega para procesos de limpieza. Los blancos utilizados en el sistema son titanio, aluminio y wolframio. Para su calibración se han preparado diferentes muestras mediante un proceso de litografía y se han llevado a cabo medidas mediante perfilometría de contacto para conocer el espesor del material depositado.

**Palabras clave:** Sistema de pulverización multicátodo por radiofrecuencia, medidas por perfilometría de contacto, fotolitografía y contactos óhmicos sobre silicio.



# Agradecimientos

---

En primer lugar, me gustaría agradecer al grupo de Láminas Delgadas y Microelectrónica de la UCM por darme la oportunidad de trabajar con ellos y poder realizar un trabajo tan interesante como el que aquí se presenta, así como su buen trato personal y sus siempre útiles consejos. En especial me gustaría agradecer a mis tutores, Dr. Germán González y Dr. David Pastor por su excelente ayuda, a David por su ayuda con la confección de la memoria y a Germán por las innumerables tardes en la sala limpia intentando hacer que funcionase el sistema, tardes de fundir cables, tardes de fascinarnos por las pruebas exitosas, tardes de rebanarnos los sesos buscando explicaciones a mil y un problemas y, cómo no, tardes de aprendizaje. No podía dejar sin mencionar a Daniel Montero, por su dedicación y ayuda prácticamente a diario, introduciéndome en los procesos de fabricación microelectrónica y siendo un apoyo esencial. También me gustaría agradecer al Taller Mecánico del Centro de Apoyo a la Investigación (CAI) de la UCM por el excelente trabajo desarrollado en la fabricación de las piezas mecánicas del sistema.

Este trabajo ha sido el culmen de un curso exigente y agotador que hubiese sido muy complicado aguantar sin la ayuda de todas esas personas que me rodean y me apoyan a diario. Personas con las que salgo de fiesta, personas con las que comparto viajes y planeo experiencias fantásticas, personas a las que puedo ver a diario y personas a las que no veo tanto como me gustaría, personas con las que disfrutar de intereses comunes con mañanas, tardes y noches de baloncesto y personas capaces de hacer que los lunes, el peor día de la semana para muchos, puedan convertirse en días fantásticos.

Y por último, no podía olvidarme de mi familia, los que nunca fallan, los que siempre están para aguantarme cuando me pongo insolente, prepotente y pesado. A ellos les debo todos y cada uno de mis éxitos, y espero poder compartirlos con ellos durante muchísimo tiempo.

Agradecer a mis padres, a los que cualquier cosa que les escribiese se quedaría muy corta, a mi hermana Silvia, sin duda mi mayor debilidad, con una relación más que especial a pesar de nuestras discrepancias, hermana que no creo que llegue a leer esto por su mezcla entre miedo y odio hacia la física, pero a la que tengo que agradecer su aportación al trabajo en dibujos y tratamiento de imágenes. Y para acabar quiero hacer un especial agradecimiento y dedicar el trabajo a mis abuelos; cuatro que me encantaría haber conocido, tres que tuve la suerte de poder disfrutar durante mi infancia y que sin duda influyeron en que a día de hoy sea la persona que soy, dos que perdí, de los que guardo un recuerdo fantástico y que me enseñaron a disfrutar de lo que se tiene, y una de la que todavía tengo la suerte de disfrutar y a la que espero poder seguir dándole guerra durante mucho tiempo más.

# Índice general

---

<b>Agraecimientos</b>	<b>iii</b>
<b>1 Introducción</b>	<b>1</b>
1.1 ¿Qué es la pulverización catódica? . . . . .	1
1.2 Influencia de la presión y de la energía de los iones . . . . .	3
1.3 Tipos de pulverización catódica . . . . .	6
1.4 Pulverización polarizada y pulverización al sustrato. . . . .	7
1.5 Necesidad de pulverización catódica en nuestro caso . . . . .	9
<b>2 Experimental</b>	<b>13</b>
2.1 Sistema de pulverización catódica . . . . .	13
2.1.1 Cámara . . . . .	15
2.1.2 Portamuestras y portacátodos . . . . .	16
2.2 Fuente de Radiofrecuencia y red de acoplo . . . . .	21
2.3 Calibración del sistema: medida de espesores . . . . .	23
2.3.1 Fotolitografía . . . . .	23
2.3.2 Depósito y reflatamiento . . . . .	25
2.3.3 Perfilometría de contacto . . . . .	27
<b>3 Resultados y análisis</b>	<b>30</b>
3.1 Parámetros del sistema de plasma . . . . .	30
3.1.1 Adaptación del plasma . . . . .	30
3.1.2 Significación y medida del <i>DC-BIAS</i> . . . . .	36

<i>ÍNDICE GENERAL</i>	vi
3.2 Espesores de las láminas depositadas . . . . .	37
3.3 Análisis cualitativo de las láminas depositadas . . . . .	39
<b>Conclusiones</b>	<b>44</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>46</b>
<b>A Anexo I</b>	<b>i</b>
A.1 El perfilómetro . . . . .	1
A.1.1 Componentes del perfilómetro . . . . .	1
A.1.2 Medicción con el perfilómetro . . . . .	3
A.2 Programa de adquisición de datos . . . . .	4
A.2.1 Panel frontal . . . . .	4
A.2.2 Funcionamiento del programa . . . . .	5
A.3 Toma de datos mediante el programa <i>Medidor espesores DAQ filtro</i> . . . . .	6

# Introducción

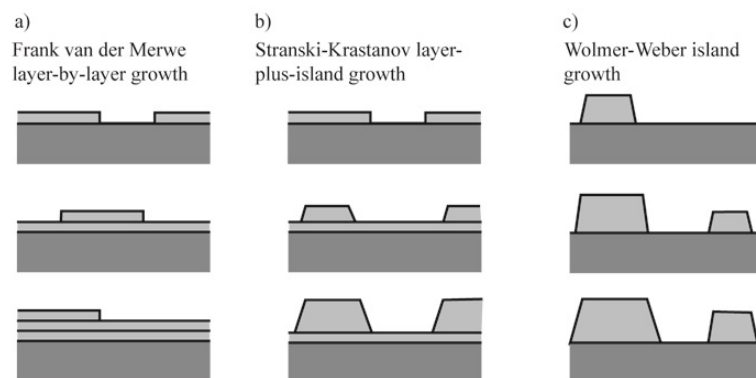
---

## 1.1 ¿Qué es la pulverización catódica?

La pulverización catódica (*sputtering* en inglés) es un proceso físico en el que se produce la disgregación de los átomos de un material sólido denominado "blanco" mediante el bombardeo de éste por iones muy energéticos. Es un proceso extensamente utilizado en microelectrónica para depositar láminas delgadas sobre sustratos. Es el proceso por excelencia de depósito físico en fase de vapor (*physical-vapor deposition, PVD*) y consta de tres etapas: extracción, transporte y nucleación.

- **Extracción:** Cuando una superficie sólida es bombardeada mediante iones con energías elevadas una porción de esa energía es transferida al sólido en forma de calor y daño a la red cristalina. En el caso de la pulverización catódica, ésta energía es transmitida mediante transferencia de momento proveniente de iones muy energéticos. La otra parte de la energía transmitida al sólido causa que algunos átomos del sólido se disgreguen y sean expulsados en estado gaseoso, que es justo el efecto denominado pulverización [1]. La capacidad de extracción de átomos del blanco depende de la energía y la masa de los iones incidentes y de las propiedades físicas del material a extraer, como son tensión superficial, cohesión entre átomos, energía de los enlaces del material, etc. El número de átomos arrancados por iones que inciden en el blanco se denomina "rendimiento de pulverización". Los átomos extraídos son esencialmente neutros. Solo una pequeña proporción salen ionizados. Esto hace que los átomos extraídos se difundan sin ser afectados por los campos eléctricos.

- **Transporte:** El transporte se realiza a través de una región de baja presión de iones excitados, el plasma, del cual hablaremos en la siguiente sección. El transporte depende fundamentalmente de la presión que hay en la cámara, lo cual condiciona el tipo de plasma que se encuentra en la misma, el recorrido libre medio de los átomos extraídos del cátodo y la contaminación que haya en la cámara y, por tanto, en la lámina depositada.
- **Nucleación:** Los átomos pulverizados se encuentran en fase gaseosa, luego fuera del equilibrio termodinámico. Como resultado, cuando uno de estos átomos llega a una superficie sólida, ya sea de la cámara o al sustrato, se condensa. El crecimiento de la lámina sobre el sustrato depende de diversos factores físicos tanto del material pulverizado como del propio sustrato, que vienen determinados por la relación entre la cinética de crecimiento del cristal y de la termodinámica de los procesos de absorción. En la bibliografía distinguen entre tres tipos de crecimiento de películas delgadas, como podemos ver en las citas [2] y [3]. Estos tres tipos de crecimiento son: 1) Volmer -Weber (VW) o en forma de islas, 2) Frank and van der Merwe (FM) o en forma de láminas y 3) Stranski -Krastanov (SK), que se encuentra entre las otras dos. Un esquema de los tres tipos de crecimiento se puede ver en la figura 1.1. Cuando un átomo llega al sustrato se solidifica y recorre la superficie, pues no transfiere toda su energía, hasta que se encuentra con otros átomos depositados de su misma especie, con los que tiene mayor adherencia. Dependiendo de cuál sea la adherencia entre el material a depositar y el sustrato aparecen los diferentes tipos de crecimiento.



**Figura 1.1:** Representación esquemática de los tres tipos de crecimiento cristalino de láminas [4].

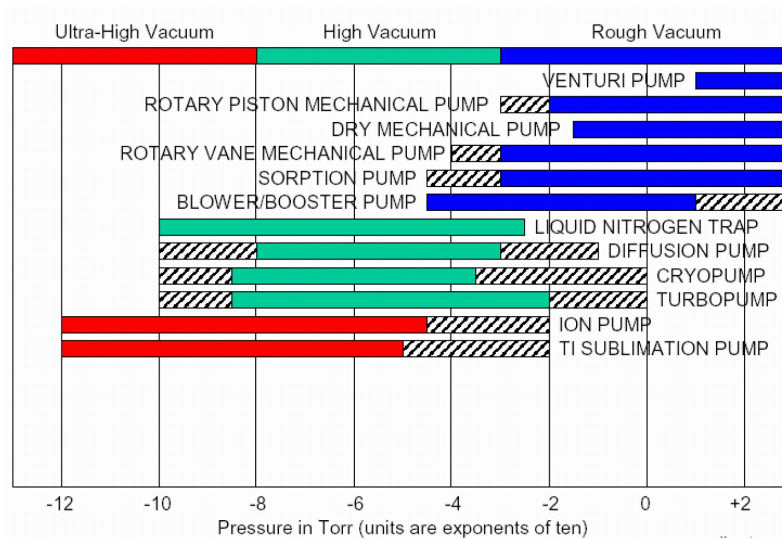
## 1.2 Influencia de la presión y de la energía de los iones

Para generar iones con altas energías que "bombardeen" la superficie del plasma, necesitamos la aparición de un plasma. El plasma es el llamado cuarto estado de la materia, consiste en un fluido que contiene no solamente átomos o moléculas eléctricamente neutras en estado gaseoso, sino también iones cargados positivamente y electrones en la misma concentración, resultando eléctricamente neutra la configuración total del plasma. Para que un volumen gaseoso pase a una configuración de plasma se necesita suministrar una alta energía al mismo, esto ocurre de forma espontánea en la naturaleza al aplicar energía en forma de calor o proveniente de descargas electromagnéticas.

En física en general y en microelectrónica en particular, este estado de la materia es de gran utilidad y ampliamente utilizado para procesos de litografía como grabado seco (*dry-etch*), o como el depósito químico en fase de vapor mejorado mediante plasma (*plasma-enhanced-chemical-vapor deposition, CVD*).

Para trabajar en microelectrónica necesitamos siempre una atmósfera muy controlada. Por ello suele ser un requisito imprescindible trabajar en salas limpias, las cuales tienen un control muy preciso de la presión, humedad, temperatura y número y tamaño de las partículas existentes, que en función del valor de estos parámetros se les confiere diferentes niveles de calidad. Además, en la mayoría sistemas para la fabricación microelectrónica se trabaja en vacío, pues el recorrido libre medio de las partículas y el tiempo de formación de una monocapa tienen que adecuados. Dependiendo del tipo de proceso, se requieren unos regímenes de vacío distintos, en nuestro caso, para la pulverización catódica, se requieren condiciones de vacío medio ( $1 \text{ mbar} - 9 \cdot 10^{-3} \text{ mbar}$ ).

Para poder llegar a las diferentes regiones de vacío (y mantenerlo) se utilizan bombas de vacío. Existen diversos tipos de bombas de vacío con características diferentes en función de la aplicación de uso. En general sustraen gas de las cámaras de dos formas distintas: mediante un mecanismo de compresión del gas soltándolo a la atmósfera cuando alcanza cierta presión (bombas de compresión) o mediante un flujo que es condensado o inmovilizado mediante alguna superficie sólida de alguna manera (bombas de captura). En la figura 1.2 se pueden ver los diferentes tipos de bombas de vacío y sus diferentes regímenes de trabajo.



**Figura 1.2:** Presiones de trabajo de diferentes bombas de vacío [5].

Además de tener en cuenta la región de presiones durante el proceso es importante estar en una región de vacío lo más alta posible (muy bajas presiones) antes de iniciar el proceso, ya que nos aseguramos de tener menos contaminación en nuestra atmósfera.

Conseguiremos plasma para solo un régimen de presiones (presiones de trabajo), y de su presión dependerán muchos de los factores que intervienen en la pulverización. Cuanto mayor sea la presión de trabajo menor será el recorrido libre medio de los iones dentro del plasma, se producirán mayor número de colisiones y los iones del plasma y los átomos arrancados del blanco tendrán direcciones menos preferenciales, haciendo que se depositen en todas las superficies de la cámara. Por otro lado ionizarán otros átomos y moléculas del plasma y darán lugar a un mayor bombardeo y por lo tanto a una mayor extracción de material a depositar. Sin embargo, cuantas menos colisiones sufran los iones cargados dispondrán de una mayor energía.

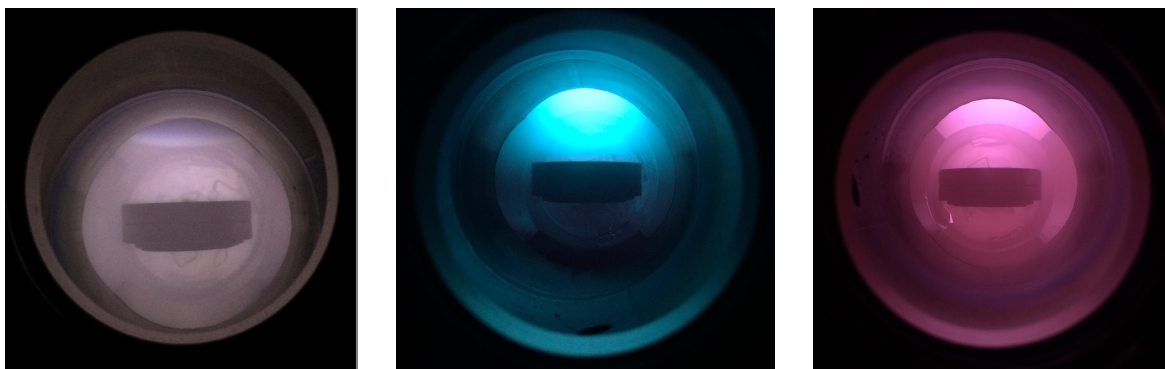
La forma más común de activar un plasma es la llamada descarga luminosa. Este método consiste en aplicar una diferencia de potencial entre un ánodo y un cátodo entre los que se encuentra un gas a baja presión. Cuando un electrón libre entra en la región del gas es acelerado debido a la diferencia de potencial entre el ánodo y el cátodo. Dependiendo de la presión a la que se encuentre colisionará con otro átomo del gas transfiriéndole energía que puede ser suficiente para que bien se excite o bien ionice. Si la energía transferida es superior al potencial



de ionización un segundo electrón es arrancado, siendo acelerado de nuevo y dando lugar así a una reacción en cadena que se sustenta a lo largo del tiempo. Cuando la energía transferida es tal que hace que un electrón del átomo se excite a un estado superior, al relajarse a su estado fundamental lo hace emitiendo un fotón que es lo que da lugar a la luminiscencia propia de los plasmas.

El plasma puede ser auto-sustentado cuando es capaz de generar electrones libres secundarios, lo cual ocurre cuando llegan iones a bombardear el cátodo y consiguen arrancar nuevos electrones. La configuración de los plasmas es siempre la misma, y en ella se pueden distinguir varias regiones entre el cátodo (cargado negativamente) y el ánodo (normalmente conectado a tierra). Cerca del cátodo aparece una región denominada *zona oscura* o *sombra*, la cual es debida que los electrones extraídos del cátodo poseen mucha energía cinética y recorren un determinado espacio que depende de la presión en la que apenas ionizan átomos, pues su capacidad de interacción es muy baja. Los electrones se aceleran mucho debido a que el campo eléctrico en esa zona es muy alto, aunque pasada esa zona su valor es prácticamente nulo.

En la figura 1.3 podemos ver tres plasmas diferentes, los cuales pertenecen a blancos de diferente material y a diferentes presiones, para ver los cambios en el color de la luz emitida y en la zona oscura que presenta cada uno.



**Figura 1.3:** Fotografías de tres plasmas en diferentes situaciones: la fotografía de la izquierda es con el blanco de Aluminio a una presión baja ( $\sim 10^{-3}mbar$ ), la del centro es con el blanco de Wolframio a presión algo más alta ( $\sim 10^{-2}mbar$ ) y la fotografía de la derecha con el blanco de Titanio con una presión similar a la anterior ( $\sim 10^{-2}mbar$ ). En todas las fotografías aparece el portamuestras (ánodo) en la parte central de la imagen, orientado en sentido contrario al cátodo. El cátodo se encuentra en la parte superior de las fotografías pero no se observa en ninguna de ellas ya que se encuentran en una parte más interna de la cámara.

En la fotografía de la izquierda de la figura 1.3 podemos ver perfectamente la zona oscura en la zona próxima a donde está el cátodo. Esta zona no la observamos en las otras dos fotografías porque la presión es mayor y por lo tanto la zona oscura es más estrecha. Además, podemos ver el contraste de colores del plasma entre las diferentes fotografías, recordando que el color es debido a las energías de emisión de los fotones emitidos al desexcitarse. Además, los átomos que conviven en ese plasma dependen del material que está siendo pulverizado, el cual es diferente en cada caso aunque todos coexistan con el mismo gas neutro, argón en nuestro caso.

### 1.3 Tipos de pulverización catódica

Existen diferentes sistemas de pulverización y se pueden clasificar atendiendo a unas u otras características. En función del tipo de gas que se emplea, en función de si se aplican o no campos magnéticos adicionales y en función de la forma de aplicar energía para ionizar el gas y conseguir un plasma.

- Los gases que se pueden emplear se dividen principalmente en dos categorías: gases reactivos y gases no reactivos. Los **gases no reactivos** no interaccionan con la lámina a depositar, como son los gases nobles. El gas más utilizado de este tipo es el Argón (Ar) debido a su bajo coste y a su buena afinidad con los materiales normalmente pulverizados (Al, Cu, Si y Ti), ya que su masa es óptima para la transferencia de momento con la mayoría de ellos. Por otro lado los **gases reactivos** son aquellos que reaccionan con el material a depositar permitiendo que se deposite una lámina cuya composición contiene átomos del material arrancado y átomos del plasma. Los gases más comunes de este tipo son el Nitrógeno ( $N_2$ ) y el oxígeno ( $O_2$ ), para obtener compuestos con silicio, como nitruro de silicio ( $Si_3N_4$ ) y óxido de silicio ( $SiO_2$ ).
- Según como se suministre la potencia al sistema distinguimos dos tipos de fuentes: fuentes de corriente continua (DC) y fuentes de radiofrecuencia (RF). El caso de corriente continua consiste en aplicar un potencial negativo al cátodo, de tal forma que el plasma aparece por la diferencia de potencial y el movimiento que siguen las diferentes cargas, como se ha visto en las secciones anteriores. Sin embargo, también es posible aplicar

una diferencia de potencial mediante una señal alterna: lo más común es trabajar a 13,56 MHz (por convenio con regulaciones de comunicaciones) aunque se podría hacer a otras frecuencias. La esencia de su funcionamiento radica en que a pesar de que se aplica corriente alterna entre el cátodo y el ánodo cuyo valor medio es nulo, al tener una movilidad mucho mayor los electrones que los iones, se produce una deriva en el potencial al transcurrir unos pocos ciclos hacia valores negativos del DC-BIAS (potencia medio de polarización), pues los iones no son capaces de seguir el campo a esas frecuencias. Hay un corto periodo de tiempo en el que los electrones bombardean el cátodo para mantener la neutralidad del mismo, pero es muy corto ya que la movilidad de éstos es mucho mayor que la de los iones [6]. La utilización de la radiofrecuencia respecto a los sistemas DC tiene la gran ventaja de poder pulverizar blancos que no tengan carácter metálico, ya que con una fuente DC no es posible reemplazar los electrones arrancados en un aislante, lo cual cargaría positivamente el cátodo haciendo que se extinguiese el plasma a los pocos segundos.

- Existe la posibilidad de añadir campos magnéticos mediante el uso de imanes. Estos sistemas se denominan magnetrones y se emplean para aumentar el rendimiento de pulverización. Para los sistemas de DC es común tener que aumentar mucho la presión para poder mantener el plasma, pues no es muy favorable la aparición de electrones secundarios. Sin embargo, trabajar a presiones elevadas reduce el rendimiento de depósito, por ello es conveniente emplear imanes para generar un campo magnético de tal forma que confine electrones en la región próxima al cátodo, lo que favorecerá el bombardeo del blanco y la emisión de electrones secundarios, al acelerarse más los electrones. De esta forma podemos trabajar a presiones más bajas que favorezcan el transporte de los átomos arrancados del blanco siendo capaces de mantener el plasma de una forma más sencilla.

## 1.4 Pulverización polarizada y pulverización al sustrato.

Cuando queremos crecer una lámina de metal sobre un sustrato es muy habitual buscar que la adherencia entre esa lámina y el sustrato sea lo más elevada posible. Como hemos comentado

anteriormente, en los procesos de fabricación de dispositivos es muy importante mantener la limpieza de las muestras. Por mucho cuidado que se ponga en el transporte de las muestras entre los diferentes equipos, éstas se oxidan, se deposita suciedad sobre ellas, etc. Con el objetivo de conseguir una mejor limpieza y por tanto una buena adherencia se emplean diferentes técnicas, como pulverización al sustrato y pulverización polarizada (*BIAS sputtering*).

La pulverización del sustrato consiste en, como su propio nombre indica, aplicar un potencial negativo al sustrato para de esa forma pulverizar el sustrato con el plasma. De esta forma extraemos átomos de la superficie de nuestra muestra o sustrato y se suele emplear para limpiar la superficie del sustrato de partículas o eliminar las primeras capas del material que no deseamos. Su gran ventaja frente a otras técnicas de limpieza es que se puede realizar justo antes del proceso de depósito sin romper el vacío, ya que solo se necesita cambiar el lugar al que se le aplica el potencial.

Siguiendo con el concepto anterior, se puede optimizar la pureza de la lámina depositada si se sigue la técnica de pulverización polarizada, que consiste en lo siguiente: A la vez que se aplica un potencial en el blanco para arrancarle átomos (técnica de pulverización tradicional) se aplica un potencial también al sustrato de menor magnitud de tal forma que pulverizamos simultáneamente el sustrato. Al pulverizar el sustrato lo que hacemos es arrancarle las capas superficiales que se encuentran, pero si conseguimos alcanzar un compromiso entre lo que arrancamos en el sustrato y lo que depositamos de tal forma que se deposite con mayor velocidad con la que pulverizamos el sustrato conseguiremos que se deposite una lámina del material que deseamos con menor contaminación que si lo hiciésemos sin pulverización al sustrato. La razón de pulverizar al sustrato mientras depositamos el material es que lo que se va depositando contiene también partículas que no deseamos que se depositen, mientras que al pulverizar el sustrato conseguimos extraer de forma mucho más eficiente las partículas no deseadas que las del material a depositar. De esta forma llegan al sustrato toda clase de partículas, pero extraemos de él con mayor eficacia las partículas no deseadas.

## 1.5 Necesidad de pulverización catódica en nuestro caso

Para entender la motivación y el objetivo de la construcción de un sistema de pulverización catódica en nuestro caso hay que definir antes el marco en el que se encuentra el Grupo de Láminas Delgadas y Microelectrónica (GLDM) de la Universidad Complutense de Madrid.

El GLDM se dedica a investigar materiales supersaturados (para conseguir semiconductores de banda intermedia) para la fabricación de dispositivos con energías de absorción por debajo del *gap* del semiconductor. Es un campo de gran interés en la comunidad científica, pues podría dar lugar a fotodetectores en el rango de infrarrojos basados en silicio, así como dispositivos fotovoltaicos de una mayor eficiencia.

Para la fabricación de estos dispositivos es necesario dopar el material con concentraciones muy por encima del límite de solubilidad sólida del material y requiere de procesos fuera del equilibrio para poder recuperar la cristalinidad del material después, obteniendo concentraciones de electrones del orden de  $10^{20} \text{ cm}^{-3}$ . El dopado del material se consigue mediante la combinación de dos procesos que operan fuera del régimen termodinámico, como son la implantación iónica para introducir el nivel de impurezas deseado y de un fundido láser pulsado de nanosegundos (*Pulsed Laser Melting, PLM*). Debido a todos los procesos fuera del equilibrio, una vez implantada la muestra no es recomendable que sufra procesos que operen fuera del equilibrio termodinámico.

Los dispositivos que se pretenden fabricar requieren de otros procesos y capas adicionales, como líneas de metalización, contactos, capas de pasivación, etc. Hasta este momento en el GLDM utilizaba el método de evaporación por haz de electrones para depositar láminas metálicas, en concreto se depositaban para los contactos eléctricos de los dispositivos. El uso de la evaporación por haz de electrones tiene diversos inconvenientes como la obligación a utilizar un tratamiento térmico posterior para conseguir contactos óhmicos, que no debe hacerse en materiales sobresaturados ya que se ha observado que podrían producir la desactivación eléctrica de los dopantes.

Los contactos eléctricos de los dispositivos que se fabricaban, eran en su mayor parte irreproducibles y en algunos casos de comportamiento eléctricamente rectificante, cuando no era ese el comportamiento deseado. Por ello se propuso el montaje de un sistema de pulverización

multicátodo. La motivación de este trabajo es mejorar los contactos eléctricos de los dispositivos en los siguientes aspectos:

- Las láminas depositadas mediante pulverización catódica mejoran a las láminas depositadas mediante evaporación por haz de electrones en cuanto a contaminación y crecimiento de la lámina se refiere.
- Se pueden realizar los procesos a temperatura ambiente, lo cual no altera las características de la muestra implantada.
- Es posible la limpieza del sustrato, como bien se ha explicado en la sección anterior, sin romper el vacío y justo antes de que comience el depósito, pudiendo eliminar así óxido nativo y otros contaminantes de la superficie.
- Son más sencillos de controlar los tiempos de depósito, y en especial si se trata de depósito de aleaciones de metales.
- En nuestro caso, al colocar tres blancos diferentes en el mismo sistema podemos fabricar electrodos metálicos para obtener contactos óhmicos de tres metales apilados sin tener que romper el vacío entre los diferentes depósitos. La obtención de contactos que consistan en tres metales diferentes apilados no es algo novedoso pues se sabe de su potencial desde hace tiempo, por ello decidimos crear un sistema que contenga tres blancos en diferentes posiciones para poder fabricarlos en un mismo proceso.

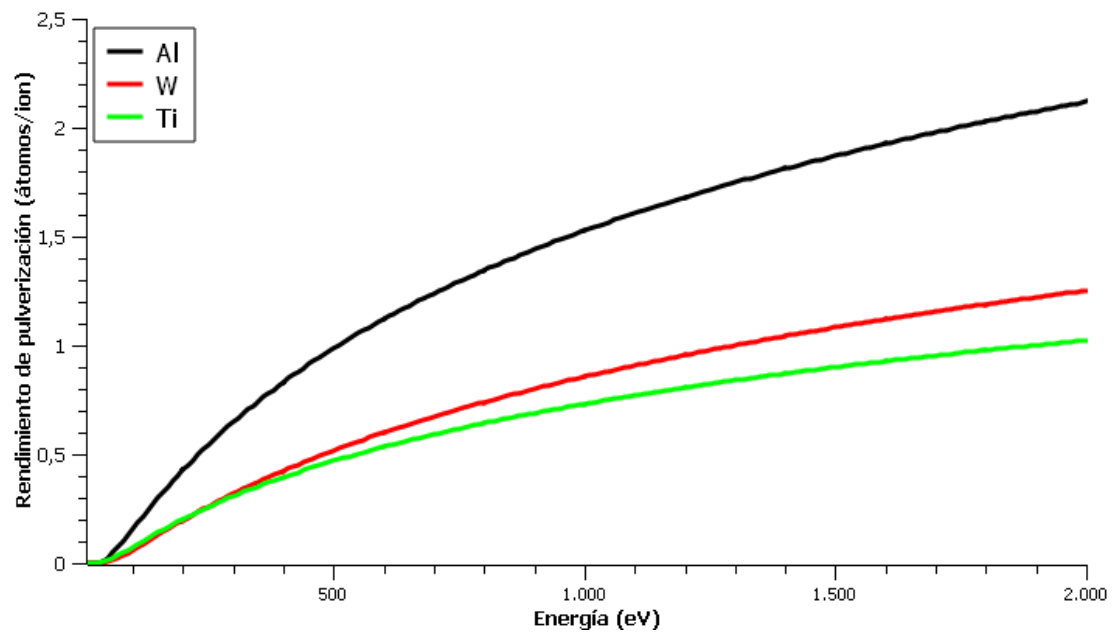
Los contactos eléctricos sobre silicio está ampliamente estudiados a lo largo de la historia. Sobre silicio dopado tipo p es suficiente depositando láminas de aluminio para crear buenos contactos óhmicos, como se puede ver en las referencias [7] y [8]. Sin embargo, para silicio dopado tipo n la cosa cambia. Para los contactos sobre silicio tipo n el Titanio ha demostrado una buena adherencia y una baja resistencia de contacto. Además, el Ti tiene multitud de propiedades intrínsecas favorables para tecnología con Si, como es la capacidad de captar oxígenos en la atmósfera, reduciendo así la contaminación. Sin embargo, el Al interacciona con el Ti y existe una alta difusión de Al sobre Ti, por ello se emplea una lámina intermedia de Wolframio para dotar de estabilidad a los contactos, preservando la lámina de Ti e impidiendo la difusión

de la capa de Al. El uso del Al está justificado ya que es imprescindible como metal más externo para poder soldar sobre él. En la referencia [9] se explican con más detalle las propiedades de estos contactos y se opta por fabricar contactos Al/W/Ti/Si (150/100/50/Si).

Debido a la necesidad de obtener buenos contactos tanto sobre silicio tipo p como tipo n se optó por el montaje de un sistema de pulverización con tres cátodos diferentes, sobre los cuales existirán blancos de Titanio (Ti), Wolframio (W) y Aluminio (Al). Se colocarán formando ángulos de 90° entre ellos, y un portasustratos giratorio que podrá orientarse en cada una de las direcciones en las que se encuentran los blancos además de una dirección adicional para procesos de limpieza en el sustrato. Todas las especificaciones técnicas del montaje experimental se describen detalladamente en el siguiente capítulo.

Como se ha visto en la sección 1.1 el rendimiento de pulverización depende de multitud de factores, como es la energía de ionización, la tensión superficial del blanco, su capacidad de interacción con los iones que bombardean la superficie, etc. En esta última parte del capítulo calcularemos el rendimiento de pulverización (*Sputtering Yield*) de los metales que vamos a utilizar en nuestro sistema. En la referencia [10] se puede ver un estudio exhaustivo sobre el rendimiento de pulverización para diferentes metales dependiendo de la composición del plasma y de la energía utilizada. Nosotros haremos los cálculos a través de la página web de la referencia [11], la cual realiza los cálculos a través de las ecuaciones de la referencia [12], que describen la interacción entre los iones del plasma y el material del blanco. En nuestro caso introduzco blancos de Al, W y Ti bombardeados con iones de Ar.

Los resultados se muestran en la figura 1.4 y como se puede observar, las ecuaciones predicen un rendimiento mucho mayor con el Al que los otros dos metales. En segundo lugar se observa el W y en último lugar, muy cerca del anterior, se encuentra el Ti. El rendimiento se calcula como el número de átomos arrancados por ion incidente.



**Figura 1.4:** Simulación del rendimiento de pulverización en función de la energía de los iones de Ar que bombardean [11]. Los metales pulverizados son Al, W y Ti.



# Experimental

---

# 2

En este capítulo se detallan todos los procesos experimentales desarrollados, desde el montaje del sistema hasta el uso de técnicas para fabricar muestras y ser capaces de calibrar el sistema montado. El parámetro principal que mediremos será el del espesor de la capa depositada en un determinado rango de presiones de trabajo.

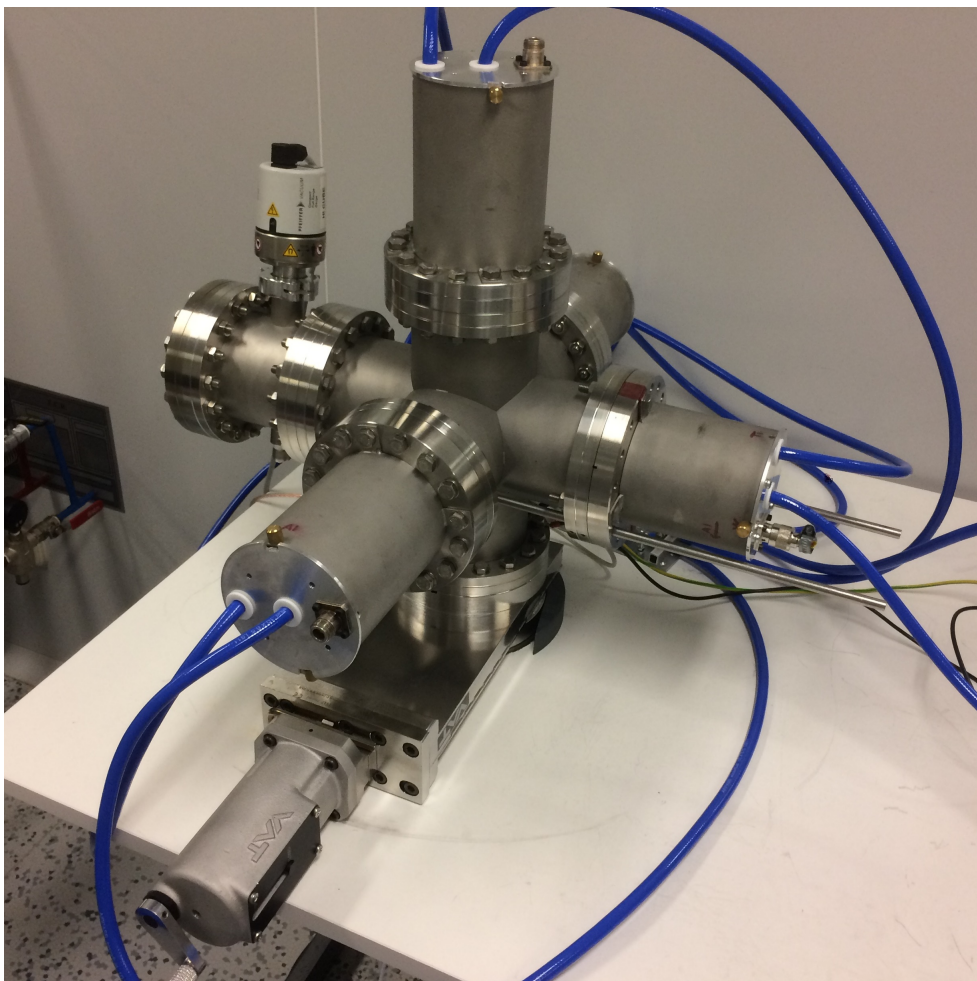
## 2.1 Sistema de pulverización catódica

El objetivo principal del trabajo consistía en el montaje de un sistema de pulverización multicátodo. En esta sección se describe con detalle todo el diseño de nuestro sistema.

Nuestro sistema de pulverización consta de varias partes diferentes. En primer lugar tenemos la cámara, que es el lugar en el que se controlará la presión y se hará vacío. Además, en su interior irá la muestra sobre la que queramos depositar a través de un portamuestras móvil y extraíble. En diferentes posiciones de la cámara irán los blancos sobre los que se realizará la pulverización (Ti, W y Al) y se dispondrá de una ventana para poder ver el interior de la misma. La cámara, aparte de estar conectada con el sistema de vacío (dos bombas colocadas en serie), estará conectada a una entrada de gas mediante una válvula de aguja. La botella del gas se encuentra en el pasillo de servicios y en nuestro caso es de Ar del 99,9999 % (6X) de pureza. El control del flujo de gas entrante se controla mediante la válvula de aguja. Además, los cátodos y portamuestras estarán refrigerados por agua.

Para conseguir un vacío óptimo utilizamos dos bombas de vacío diferentes, una bomba mecánica rotatoria para llegar a presiones de  $10^{-2}$  mbar desde presión atmosférica y luego una

bomba turbomolecular para alcanzar presiones menores a  $10^{-8}$  mbar. Las dos bombas están una a continuación de la otra y se conectan con la cámara a través de una válvula de guillotina que regula la conexión entre éstas, pudiendo así controlar el flujo desde la cámara hacia las bombas de vacío. Este elemento es imprescindible para evitar que les llegue un flujo de gas mayor al que pueden soportar haciendo que se calienten o que incluso lleguen a romperse.



**Figura 2.1:** Vista general del sistema de pulverización multicátodo. En la imagen se puede observar la cámara, a la que van conectados los diferentes cátodos que se encuentran ocultos tras las tapas en las bocas trasera, superior y frontal. También se puede observar las tuberías de la refrigeración por agua de los cátodos y el portamuestras. En el brazo lateral izquierdo podemos ver el medidor de presiones, y en su extremo se encuentra la ventana por la que se observa el interior de la cámara. Por último, en la imagen se ve la manivela de la válvula de guillotina en la parte inferior de la cámara, la cual conecta con el sistema encargado del vacío..

En la figura 2.1 se puede observar una imagen del sistema de pulverización multicátodo montado. No aparecen en la imagen ni las fuentes de RF ni las bombas de vacío ni la botella de

gas.

Se han empleado diferentes materiales y se han elegido cuidadosamente en función de las características necesarias de cada pieza. Los diferentes materiales se encuentran descritos a continuación. Acero 306 para la cámara y todas sus tapas, así como para portacátodos y portamuestras; éste material es un acero conductor y no ferromagnético y es empleado por la mayoría de sistemas de vacío. Se utiliza teflón para las piezas que queremos que sean aislantes, principalmente para separar piezas de los cátodos a las que se les aplica un potencial de las piezas conectadas a tierra. También utilizaremos latón para determinadas piezas que precisan de una alta conductividad eléctrica, principalmente en los cátodos y portamuestras. Por último tenemos juntas de goma y cobre para sellar el vacío.

### 2.1.1 Cámara

Cada parte del sistema ha sido diseñada y fabricada con mucha precisión, y en estas subsecciones se describen con detalle. En primer lugar tenemos la cámara, de acero 306, geometría esférica y con 6 bocas distribuidas como las caras de un cubo, todas ellas con alguna funcionalidad:

- En la boca lateral izquierda se encuentra el medidor de presión, la entrada del gas y una ventana por la que observar el interior.
- En las bocas frontal, superior y trasera se encuentran situados los tres cátodos, con el siguiente orden: Ti en la trasera, W en la superior y Al en la frontal.
- En la boca lateral derecha se encuentra el portamuestras. Esa tapa se sella con una junta de goma ya que necesita ser abierta continuamente para extraer e introducir muestras.
- Por último, en la boca inferior se encuentra la válvula de guillotina que comunica con la bomba turbomolecular. Debajo de la mesa se encuentra una salida en la pared que conecta con el pasillo de servicios donde se sacan los tubos y cables que corresponden a gases, entradas de tierra y agua refrigerada.

En la figura 2.1 se observa una fotografía del sistema, y un plano de la cámara con un cátodo y el portamuestras en la figura 2.2.

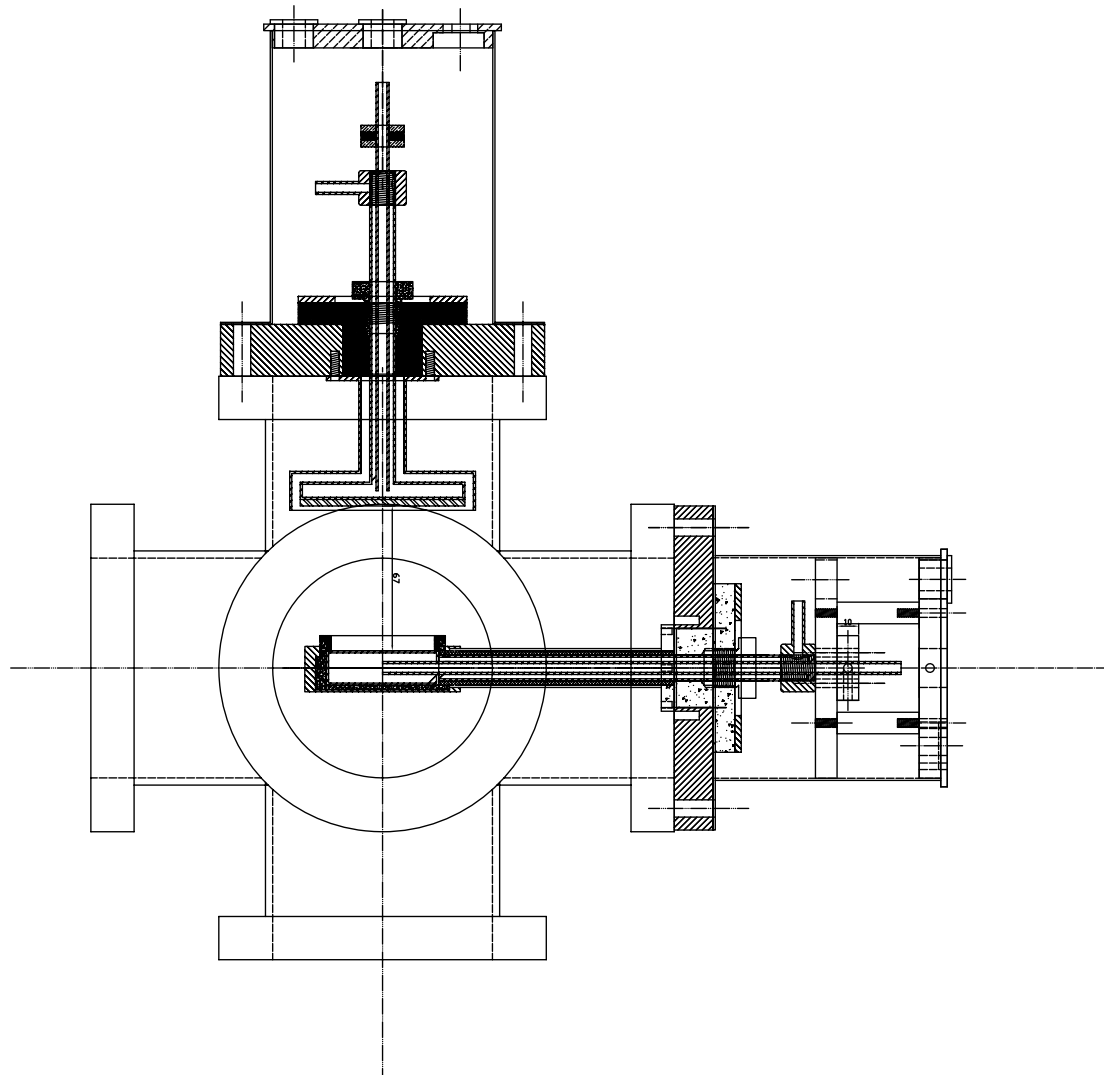
### 2.1.2 Portamuestras y portacátodos

Por último, en esta sección repasaré los detalles del portacátodos y del portamuestras, pues su diseño y sus especificaciones son complejas.

En la figura 2.3 podemos observar una imagen de un portacátodos montado sobre una tapa, la cual irá sellada a la cámara mediante un sello de cobre. En la parte de abajo se pega el blanco sobre el que haremos pulverización. Para explicar bien todas las piezas y su utilidad no ayudamos del desglose en planos que aparece en la figura 2.4.

El portacátodos sobre el que va pegado el blanco es la pieza 4. Está hecho de acero excepto el final del mismo, donde se pega con el blanco, esa parte está hecha de cobre y se ha soldado al acero, pues tiene una mayor conductividad térmica y es una zona clave para que se transmita toda la potencia al blanco. Ésta pieza además necesita estar refrigerada por agua, por ello contiene otro tubo concéntrico en su interior. La entrada de agua se hace por su extremo y la salida mediante un orificio que está conectado con la pieza 5, la cual es de latón y a ella se engancha la tubería. El tubo del portacátodos entra a través de las piezas 2 y 3 sellando el vacío. La pieza 2 sella el vacío mediante una junta de goma plana y la pieza 3 mediante una junta de goma tórica. La pieza 6 es una pantalla metálica para el portacátodos y se sujeta a la tapa de acero del sistema. La pieza 13 es la que se utiliza para la conexión eléctrica del cátodo, por ello es de latón y lleva tornillos roscados para garantizar un mejor contacto. Por último se diseñaron unas fundas de acero de seguridad que encierran al cátodo y llevan un conector para introducir la radiofrecuencia.

La refrigeración de los cátodos es de extrema importancia ya que éstos trabajarán a potencias muy elevadas y harán que se caliente notablemente todo lo que les rodea. Por ello refrigeramos mediante agua los tres portacátodos y el portamuestras. Además hemos añadido indicadores de flujo de agua de ruleta que nos indican si está circulando de agua por el sistema. Todas las llaves del agua se encuentran sobre una placa de aluminio conectada a tierra para desviar la radiofrecuencia que pudiese circular por el agua.



**Figura 2.2:** Plano del diseño de la cámara con un portacátodos montado en la parte superior y el portamuestras en la parte derecha. Todas las piezas de la cámara son de acero 306, así como las tapas. Está sellada con las tapas de los portacátodos mediante sellos de cobre y con el portamuestras mediante una junta de goma.

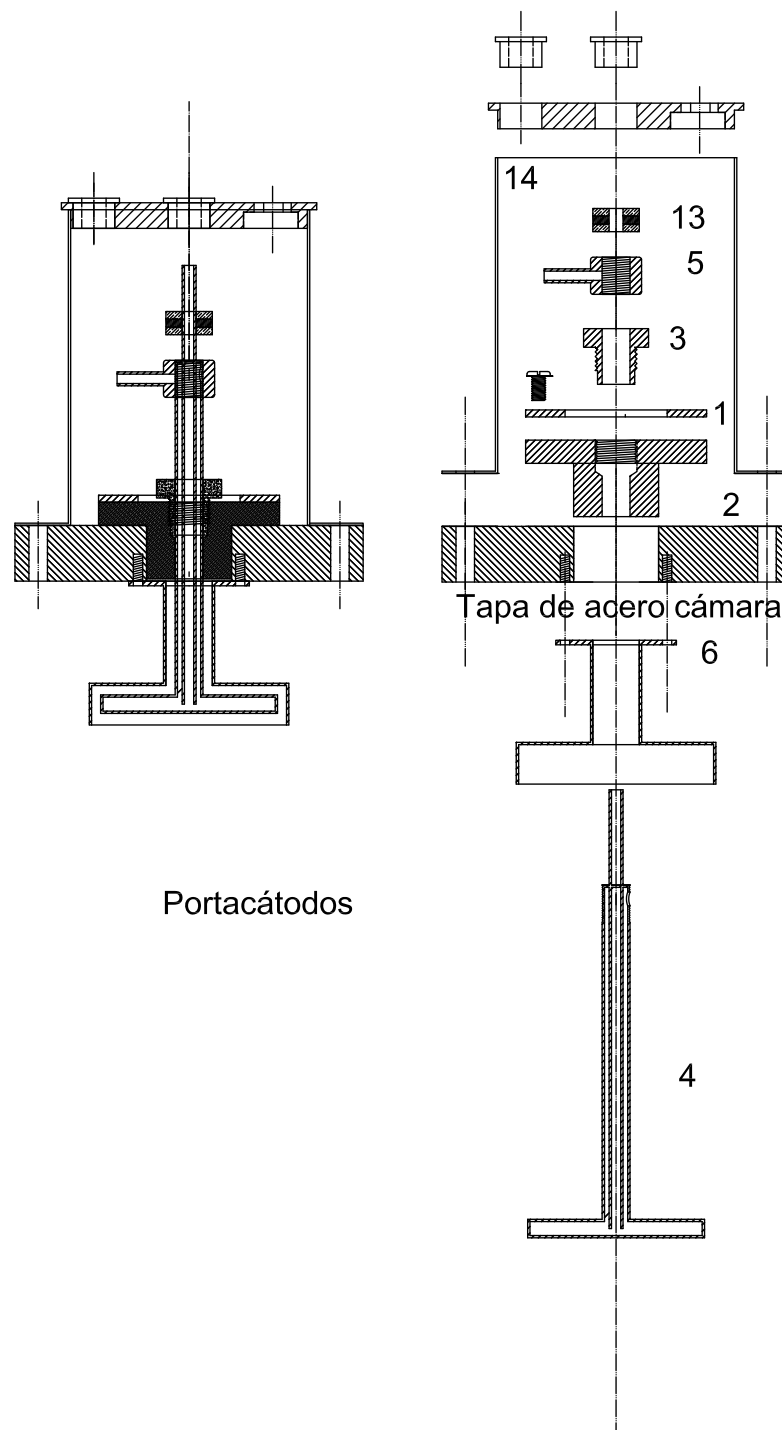


**Figura 2.3:** Portacátodos antes de ser montado en la cámara central.

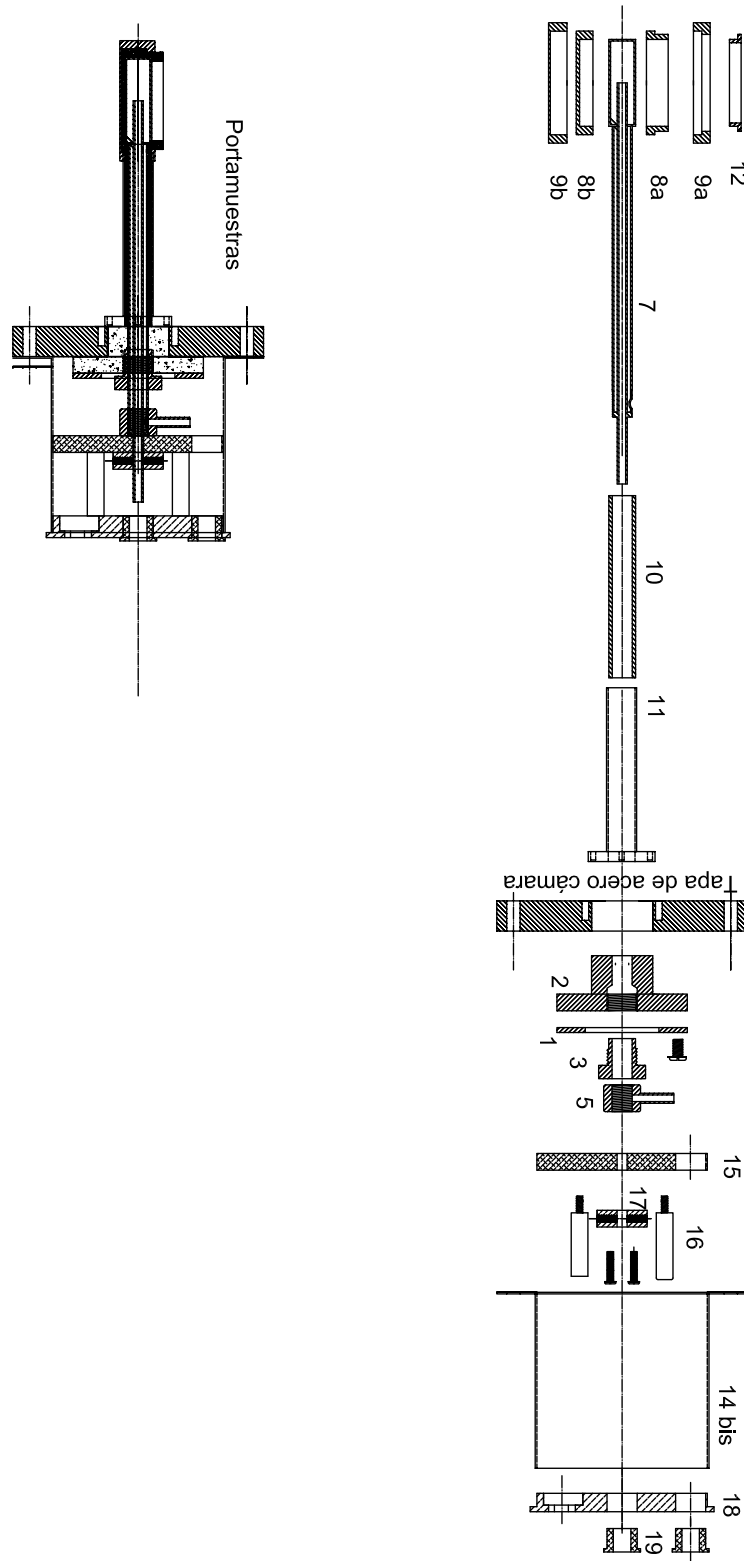
El portamuestras sigue el patrón de los portacátodos, pero con algunas diferencias notables. Se puede observar su plano y el desglose en piezas en la figura 2.5.

En el portamuestras la clave radica en que éste pueda girar 360°, y por ello la protección tiene tantas piezas, ya que se necesita poder girarla pero sin tocar la pieza por la que se aplicaría la corriente eléctrica. Por ello se diseña de esa forma para poder girar la tapa desde fuera sin que se vea alterado el resto. El vacío va sellado de la misma forma que en los cátodos, mediante las piezas 2 y 3. La otra parte que es diferente es la parte que sujeta la muestra en sí, pues tiene que estar orientada perpendicularmente al eje del tubo. Por ello se diseña con piezas de aislante intercaladas entre piezas metálicas, estas fundas metálicas exteriores actúan como las pantallas de los portacátodos. El sistema de refrigeración también es muy similar a los portacátodos, a través de la pieza 5.

El portamuestras tiene un diámetro de 52 mm de diámetro, para poder realizar procesos sobre obleas enteras de 2 pulgadas. Los portacátodos tienen un diámetro mayor, los blancos son



**Figura 2.4:** Planos del portacátodos, a la izquierda montado y a la derecha un desglose en piezas. Piezas: (1) arandela metálica, (2) tapón de teflón, (3) tapón de latón, (4) portacátodos, (5) cierre roscado toma de agua, (6) pantalla metálica para el portacátodos, (13) pieza para conexión eléctrica y (14) funda para protección.



**Figura 2.5:** Planos del portamuestras, a la izquierda montado y a la derecha un desglose en piezas. Piezas: (1) arandela metálica, (2) tapón de teflón, (3) tapón de latón, (5) cierre roscado toma de agua, (7) portamuestras en acero, (8) aislante de teflón del portamuestras en dos piezas, (9) funda metálica sobre el aislante de teflón del portamuestras, (10) funda de teflón para el eje del portamuestras, (11) funda metálica que cubre el tubo aislante (12) arandela de teflón para sujetar las muestras, (14 bis) funda de protección, (15) disco de metacrilato, (16) tornillos que conectan 18 con 15, (17) pieza para conexión eléctrica, (18) tapa y (19) piezas de teflón para el paso de las mangueras.

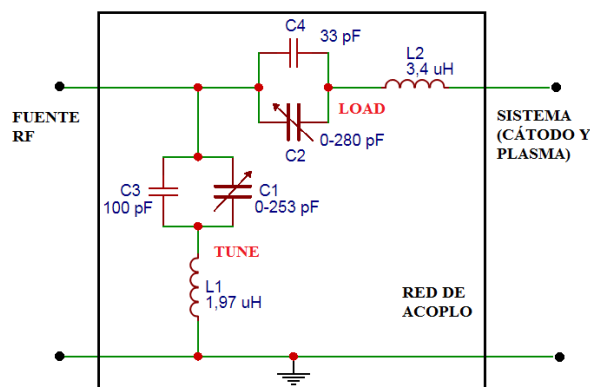


de 3 pulgadas (76,2 mm).

## 2.2 Fuente de Radiofrecuencia y red de acoplo

Como hemos comentado en el capítulo anterior, para suministrar potencia al sistema utilizamos una fuente de radiofrecuencia. Todas las fuentes de radiofrecuencia necesitan estar conectadas con el sistema a través de una red de acoplo, la cual se encarga de adaptar las impedancias entre los sistemas y los cables para evitar la pérdida de potencia por reflexiones. Tanto los sistemas como los cables trabajan a  $50\ \Omega$ , luego la red de acoplo tiene que hacer que a la salida de la fuente el sistema se encuentre con una impedancia de  $50\ \Omega$ , ya que si reflejase mucha potencia al sistema podría dañarlo.

La fuente de radiofrecuencia se encarga de generar una señal de 13.56 MHz con amplitud variable que podemos controlar (controlamos directamente la potencia). Sin embargo, la clave para que funcione radica en la red de acoplo, la cual consiste en una serie de inductancias y de condensadores variables que permiten que se acople con la impedancia del plasma. Al ser elementos reactivos no consumen potencia. La configuración de nuestra red de acoplo aparece en el esquema de la figura 2.6.



**Figura 2.6:** Esquema de la red de acoplo de nuestro sistema. Se ven dos ramas diferentes, el *LOAD* y el *TUNE*, cada una de ellas compuestas por una bobina en serie con condensadores.  $L1$  y  $L2$  son dos inductancias fijas de los valores que aparecen.  $C1$  y  $C2$  son dos condensadores variables en el rango que aparece y tanto  $C3$  como  $C4$  son diferentes condensadores adicionales al condensador variable en paralelo con él. A la derecha de la red de acoplo se encontraría el sistema al que queremos suministrarle la potencia ya a la izquierda la fuente de radiofrecuencia.

Se sabe que cuando las impedancias están adaptadas, la impedancia de la red de acoplo más la impedancia de lo que tenga conectado a la derecha tiene que ser igual a  $(50 + 0i) \Omega$ . En ese caso, conociendo los valores de los condensadores variables y conociendo el resto de impedancias de la red de acoplo podemos calcular la impedancia de lo que tiene conectado a su derecha. Se realizará un estudio de la impedancia del plasma para diferentes presiones y para los tres cátodos.

La impedancia de lo que tiene a su salida la red de acoplo ( $Z_P$ ), cuando el plasma está adaptado viene dado por la ecuación

$$Z_P = \frac{50Z_T}{Z_T - 50} - Z_L, \quad (2.1)$$

donde  $Z_L$  es la impedancia de la rama *LOAD* y está definida como

$$Z_L = j\omega L_2 - \frac{j}{\omega(C_2 + C_4)}, \quad (2.2)$$

y  $Z_T$  es la impedancia de la rama *TUNE*

$$Z_T = j\omega L_1 - \frac{j}{\omega(C_1 + C_3)}. \quad (2.3)$$

Además, conociendo las impedancias de los diferentes plasmas se puede hacer una simulación para observar e intentar comprender el comportamiento de la impedancia que ve la fuente de radiofrecuencia para los diferentes valores posibles de los condensadores variables, haciéndonos así una idea de la sensibilidad de éstos, pues la potencia reflejada en ese punto depende directamente de la impedancia que se encuentra la fuente a su salida. Se estudiará la estabilidad de ese mínimo de potencia reflejada mediante una simulación en *Matlab*. Su estudio también nos indicará cuál sería una configuración óptima de la red de acoplo. La impedancia que se encuentra la fuente de RF a su salida es

$$Z_{Total} = \frac{(Z_L + Z_P)Z_T}{Z_L + Z_P + Z_T} \quad (2.4)$$

El sistema, además de requerir unos valores de las capacidades variables para los cuales la potencia reflejada es mínima nos proporciona un valor de tensión de polarización (*DC-BIAS*). El *DC-BIAS* es el valor medio de la polarización del cátodo, ya que no es cero debido a la mayor movilidad de los electrones, que tardan mucho menos tiempo en responder al campo en la zona cercana al cátodo, haciendo que el tiempo que éste permanece con un potencial negativo sea mayor para que les dé tiempo a los iones a llegar al cátodo y así conseguir la neutralidad del mismo en el periodo estacionario. Se puede hacer una relación directa del valor del *DC-BIAS* con la energía del plasma (energía de los iones) y estudiaremos su relación con la presión y otros parámetros.

## 2.3 Calibración del sistema: medida de espesores

Para la calibración del sistema fabricaré una serie de muestras que me permitan medir el espesor de las capas depositadas bajo diferentes condiciones. Los procesos necesarios para la calibración del sistema se detallan en las siguientes subsecciones.

### 2.3.1 Fotolitografía

Ya que el objetivo es que pueda medir espesores fabricaré muestras con un determinado motivo que actuará como máscara para depositar sólo en ciertas regiones de la muestra y así poder medir el espesor del depósito en dichas zonas. El uso de máscaras para elegir zonas en las que depositar o sobre las que hacer diferentes ataques es ampliamente utilizado en microelectrónica, pues prácticamente todos los dispositivos electrónicos requieren de ello, éste proceso es conocido como fotolitografía.

Los pasos de un proceso litográfico aparecen ilustrados en la figura 2.7 y se describen a continuación:

- a) Se prepara y se limpia la oblea sobre la que se va a hacer el proceso litográfico. En nuestro caso se pasa un flujo de nitrógeno con cierta presión sobre la superficie y se realiza una

deshidratación calentando la muestra 100 °C durante 10 min.

- b) A continuación se coloca la muestra sobre el centrifugador, se aplica el material fotorresistente, y se hace girar a altas revoluciones para que se distribuya uniformemente por toda la superficie. En nuestro caso utilizamos primero un material de imprimación ya que el fotorresistente positivo no se adhiere bien al sustrato. Aplicamos el adherente *TI primer* y hacemos girar la muestra a 6000 rpm durante 30 segundos. A continuación aplicamos el material fotorresistente positivo (AZ 4533) y hacemos girar la muestra a 4000 rpm durante otros 30 segundos. El material fotorresistente debe haberse distribuido uniformemente por toda la muestra. El espesor de la capa depende no solo de los parámetros de centrifugación, sino también de la viscosidad y de la temperatura, en nuestro caso el espesor es de unas 3  $\mu m$ . Dejamos que la muestra se rehidrate a temperatura ambiente durante 1 hora.
- c) Colocamos la muestra y alineamos la máscara que vamos a utilizar y exponemos la muestra a luz ultravioleta durante 22 segundos.
- d) Ahora las zonas que han sido iluminadas por la luz UV son fáciles de retirar mediante un proceso de revelado. Para el revelado sumergimos la muestra en el revelador AZ 826 MIF y agitamos durante 90 segundos. Limpiamos la muestra mediante un baño doble en agua deshionizada y soplado con la pistola de nitrógeno. Por último se calienta la muestra a 117 °C durante 5 minutos para fortalecer el fotorresistente que se ha quedado.

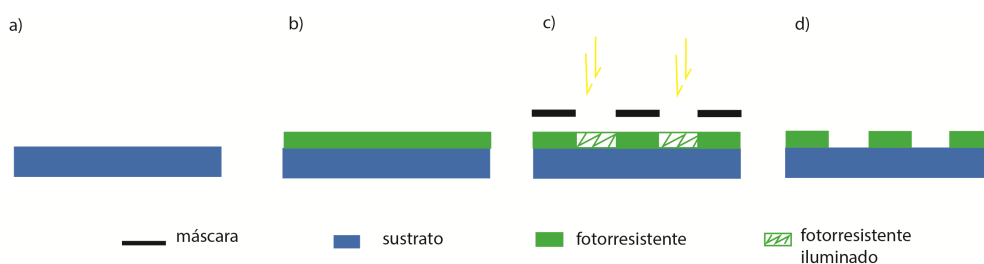


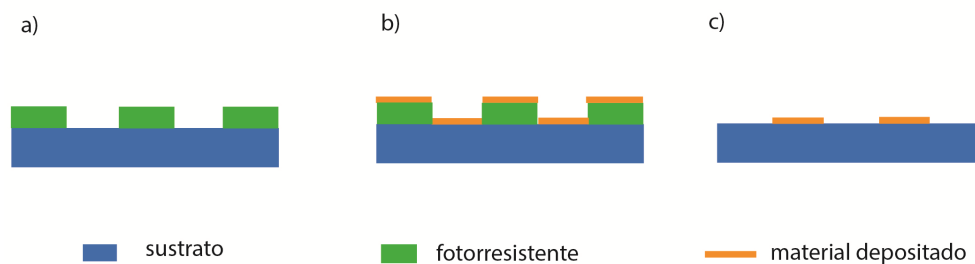
Figura 2.7

### 2.3.2 Depósito y reflatamiento

Una vez tenemos la oblea con el motivo sobre la superficie que queríamos la cortamos en pequeñas muestras de  $1 \times 1 \text{ cm}^2$  para tener muchas muestras para distintos procesos.

Hemos realizado un estudio del espesor depositado para cinco presiones diferentes y para cada uno de los cátodos que tenemos. Las presiones elegidas son :  $3 \cdot 10^{-3} \text{ mbar}$ ,  $6,3 \cdot 10^{-3} \text{ mbar}$ ,  $1,2 \cdot 10^{-2} \text{ mbar}$ ,  $2,5 \cdot 10^{-2} \text{ mbar}$  y  $4,6 \cdot 10^{-3} \text{ mbar}$ , es decir, una escala en octavas.

El proceso que sigue la muestra después de la litografía y ser cortada aparece ilustrado en la figura 2.8 y consiste en: a) Limpieza de la muestra antes de introducirla en el sistema de pulverización multicátodo, b) proceso de pulverización mediante el que se deposita una lámina del materia pulverizado sobre toda la muestra y c) mediante reflatamiento levantamos el material fotorresistente que quedaba en la muestra, llevándonos con él lo que haya depositado encima. De esta forma conseguimos haber depositado sólo en algunas zonas de la muestra y podremos medir los escalones para obtener el espesor de la capa depositada.



**Figura 2.8**

Para el proceso de depósito sigo los siguientes pasos:

- Introducir la muestra previa limpieza en el sistema de pulverización, encender el agua para la refrigeración de cátodos y portamuestras y dejar el sistema haciendo vacío
- Una vez alcanza un vacío suficiente ( $\sim 10^{-6}/10^{-7} \text{ mbar}$ ) cerramos la válvula de guillotina para reducir el flujo de gas que va hacia las bombas de vacío y abrimos el gas (Ar) hasta alcanzar la presión de trabajo deseada.
- Orientamos el portamuestras en sentido contrario al cátodo y encendemos el plasma. Realizamos pulverización al cátodo durante 10 min con la presión a la que ha aparecido el

plasma, seguidamente cambiamos la presión al valor al que queramos realizar el depósito sobre la muestra y mantenemos el plasma sin orientar la muestra hacia el cátodo durante otros 10 min. Este proceso es el de acondicionamiento del plasma, necesario para limpiar el cátodo y que se forme una atmósfera estable. Mientras está el plasma encendido tenemos que variar los condensadores de la red de acoplo para conseguir una potencia reflejada lo más baja posible.

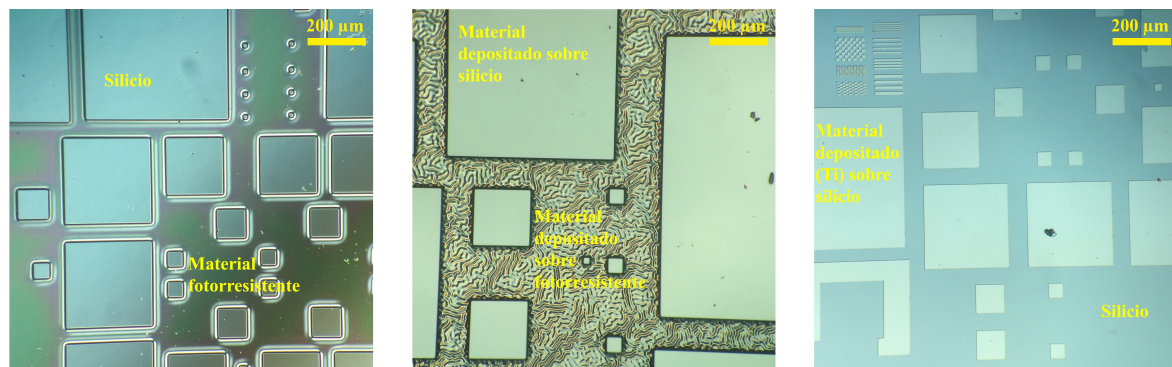
- Una vez el plasma está estable giramos el portamuestras y dejamos el plasma encendido durante 45 min. En ese tiempo se depositará sobre la muestra el material arrancado del blanco.
- Pasados los 45 min apagamos el plasma, cerramos el gas y abrimos la válvula de guillotina, dejando que el sistema recupere el vacío. El vacío último que alcance nos indicará si hemos depositado, ya que suele bajar por debajo del vacío previo que teníamos. Apagamos las bombas de vacío, abrimos la cámara y recogemos la muestra.

Para todos los depósitos realizados en este trabajo utilizamos una potencia incidente de 100 W intentando que la potencia reflejada sea 0 W. La duración de todos los procesos es la misma, 45 min, y a todos los depósitos les precede un acondicionamiento previo del plasma, así como una limpieza de los blancos.

Para el reflotamiento (*lift-off* en inglés) sumergimos la muestra en TechnistripMicro D350, que es un disolvente encargado de atacar al material fotorresistente que quedaba y eliminarlo de la superficie de la muestra. Para todas nuestras muestras hemos seguido el mismo proceso, para eliminar todo el material fotorresistente la sumergimos en el ácido a 40 °C y agitamos durante 8 minutos. Como no es suficiente aplicamos ultrasonidos durante 4 min a esa misma temperatura. Con el transcurrir de los experimentos se ha comprobado que hasta que no se aplica el baño con ultrasonidos apenas se levanta el material fotorresistente, pero se ha decidido mantener los 8 minutos agitándola para que todas estuviesen en las mismas condiciones.

En la figura 2.9 se puede ver la evolución de la muestra desde que sale del proceso de fotolitografía hasta después del reflotamiento. Los motivos que aparecen son los propios de la

máscara utilizada, aunque las imágenes estén tomadas en lugares distintos.



**Figura 2.9:** Imágenes tomadas con un microscopio de 12,5 aumentos. Las imágenes corresponden a diferentes etapas en la fabricación de muestras para medir espesores. a) Imagen de la muestra después del proceso litográfico y antes del depósito, b) imagen de la muestra justo después del depósito y c) imagen de la muestra después del reflow. El material depositado es Ti y la presión que se utilizó fue de  $6,3 \cdot 10^{-3}$  mbar.

En la muestra después del depósito vemos que tenemos simplemente zonas donde sólo se ve el sustrato y cuadrados sobre los que hemos depositado mediante pulverización catódica uno de los materiales que tenemos en los blancos, en este caso se trata de Titanio.

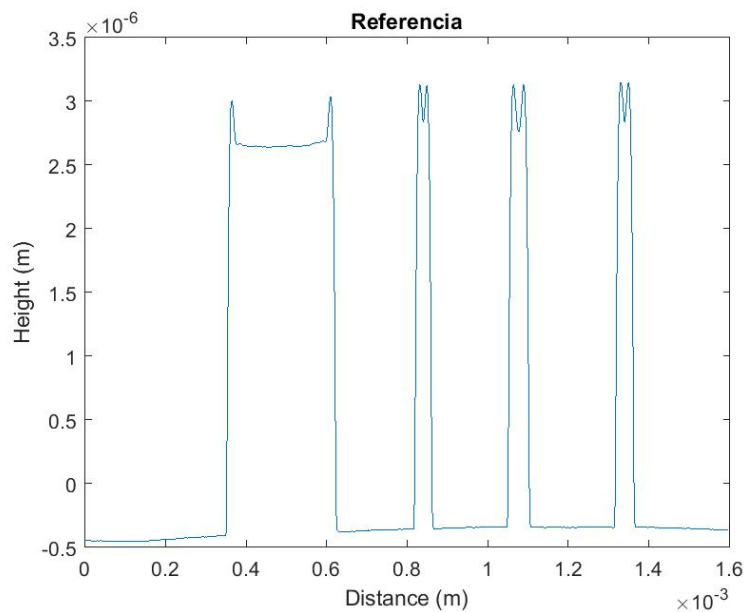
### 2.3.3 Perfilometría de contacto

Por último, una vez que tenemos las muestras, procedemos a medir el espesor mediante perfilometría de contacto. Para ello utilizamos el perfilómetro Solan Dektak 900050. Éste equipo es capaz de medir perfiles con una resolución de nanómetros.

Durante una colaboración anterior con el grupo digitalicé el perfilómetro para facilitar el análisis de datos y obtener resoluciones más precisas, pues estaba fabricado para obtener las medidas dibujando con una plumilla sobre un rollo de papel que iba desplazándose. El manual de uso y las especificaciones técnicas se pueden encontrar en el Anexo A.

En nuestras muestras, tal y como se ha visto en la figura 2.9 tenemos infinidad de cuadrados de diferentes tamaños sobre los que podemos medir el perfil, generalmente buscaremos seguir una línea que atraviese varios cuadrados para así poder calcular el espesor reduciendo el error mediante tratamiento estadístico de datos.

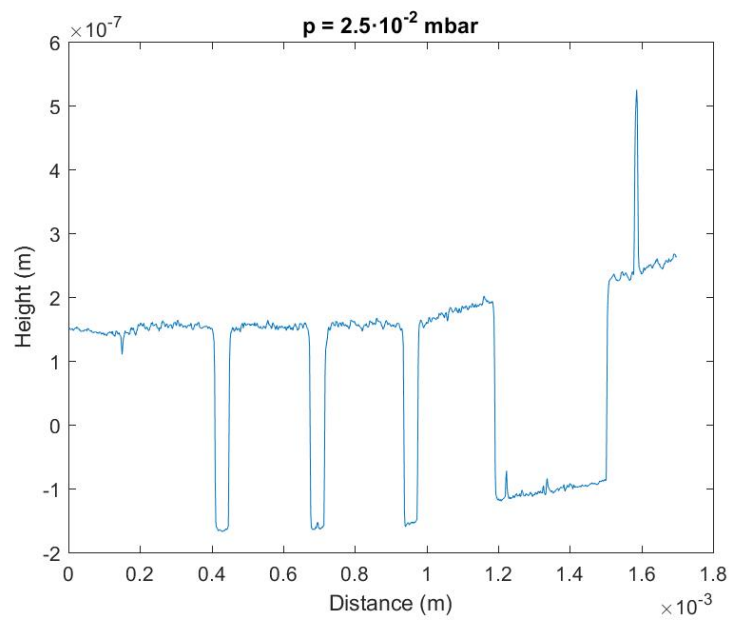
Un ejemplo de los perfiles que obtenemos puede observarse en la figura 2.10. Ése perfil corresponde a una muestra antes del depósito y, obviamente, antes del reflow. El perfil que se observa es simplemente el del material fotorresistente sobre el sustrato de silicio. Se puede observar que en los límites de las zonas depositadas se acumula una mayor cantidad de material fotorresistente, que como se aprecia tiene efectos de borde. El material depositado después del reflow quedará depositado en las zonas donde ahora vemos ventanas, las zonas de perfil bajo. Vemos que la zona elegida tiene tres aperturas bien definidas entre zonas de material fotorresistente, cuando el material se deposite procuraremos medir siempre sobre esos cuadrados de la muestra.



**Figura 2.10:** Perfil de una muestra con litografía positiva medida mediante perfilometría de contacto. El espesor del material fotorresistente es de  $3,08 \pm 0,01 \mu m$ .

Los perfiles de las muestras sobre las que hemos depositado y luego hemos realizado el reflow son menos regulares. Además los espesores depositados son mucho menores, del orden de cientos de nanómetros, no de micras, lo que dificulta su medición. Un ejemplo se puede encontrar en la figura 2.11





**Figura 2.11:** Perfil de una muestra con depósito de Aluminio a una presión de  $2,5 \cdot 10^{-2}$  mbar y una potencia de 100 W durante 45 minutos. El espesor de la capa depositada es de  $312 \pm 9$  nm.

# Resultados y análisis

---

Durante este capítulo se presentan los resultados y se aportan las explicaciones y desarrollos necesarios para tratar de comprenderlos. Como hemos visto en los capítulos anteriores el sistema construido y los procesos que involucran su caracterización aúnan infinidad de parámetros que se influyen entre sí. Se discutirán las dificultades de determinar razones absolutas para los comportamientos observados de las diferentes variables.

## 3.1 Parámetros del sistema de plasma

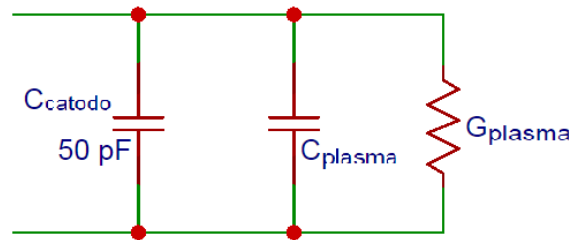
Con el fin de entender el proceso de pulverización y de depósito sobre el sustrato de una forma más completa se realizará un estudio del plasma durante el proceso de pulverización. Este estudio consistirá en analizar diferentes parámetros, como son: impedancia del plasma, sensibilidad de parámetros que podemos controlar para su acoplo mediante la red de acoplo y valores de energía y *DC-BIAS*.

### 3.1.1 Adaptación del plasma

En primer lugar calculamos la impedancia que tiene la red de acoplo a su salida para todas las presiones y cátodos que tenemos. Ésta impedancia resulta en una impedancia compleja en la que su valor de la parte imaginaria es siempre negativo, lo que que significa en una parte reactiva de tipo capacitivo. A esta impedancia  $Z_P$  tenemos que restarle el valor de la capacidad intrínseca del cátodo, la que aparecería cuando no existiese plasma. Ésta impedancia del cátodo

fue medida a 13 MHz mediante un analizador de impedancias y su valor corresponde a un condensador en paralelo con el plasma de 50 pF.

El circuito equivalente de lo que se encuentra la red de acoplo a su salida (despreciando la impedancia del cable que conecta con el sistema) es el que aparece en la figura 3.1. La impedancia del plasma es común modelarla como un condensador y una conductancia en paralelo [13].

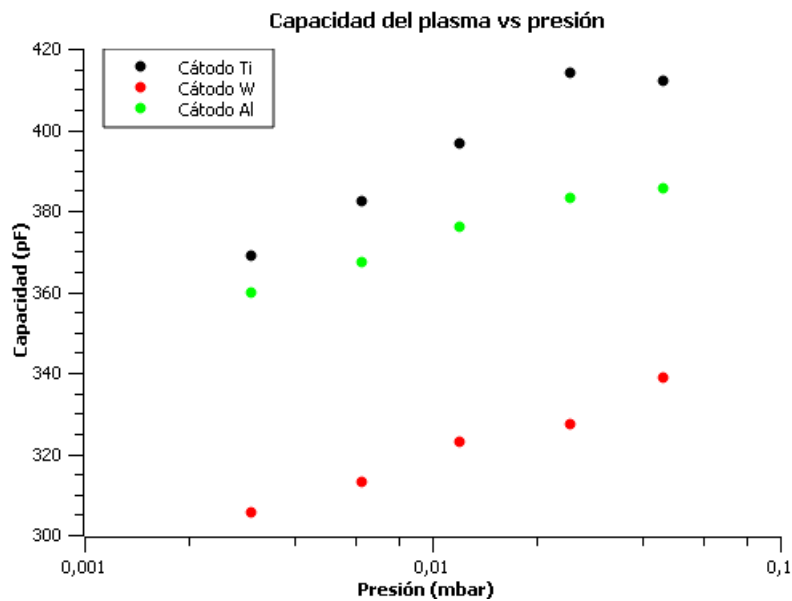


**Figura 3.1:** Esquema de la impedancia que encuentra la red de acoplo a su salida, la cual consta de una capacidad parásita del cátodo y la impedancia del plasma.

Con los datos que tenemos para los tres blancos (Ti, W y Al) y las presiones de  $3 \cdot 10^{-3}$  mbar,  $6,3 \cdot 10^{-3}$  mbar,  $1,2 \cdot 10^{-2}$  mbar,  $2,5 \cdot 10^{-2}$  mbar y  $4,6 \cdot 10^{-3}$  mbar obtenemos unos valores para impedancia del plasma. Los valores de la capacidad se obtienen de la componente imaginaria de la impedancia del plasma, y los valores de la conductancia de su componente real.

Como se aprecia en la figura 3.2 la capacidad del plasma aumenta a medida que aumentamos la presión, no es una relación lineal, pues el eje de presiones es logarítmico. Eso puede ser debido a que la zona oscura es menor a medida que aumentamos la presión, lo cual está relacionado con una mayor densidad de iones, haciendo que su recorrido libre medio sea menor. Estos resultados están de acuerdo con la referencia [13].

Además se puede ver una clara diferencia para los tres blancos. Esto nos indica que las características eléctricas de los tres plasmas son diferentes. Esta evidencia también aparece al comparar los colores de los plasmas para los tres blancos, pues son muy distintos. El cambio en el color de los plasmas nos indica que los átomos arrancados del blanco también emiten radiación, y con una eficiencia significativa, puesto que podemos distinguir entre colores rosados, violetas y azules. La emisión de los iones de Argón resulta en colores violetas, los cuales



**Figura 3.2:** Capacidad del plasma en función de la presión.

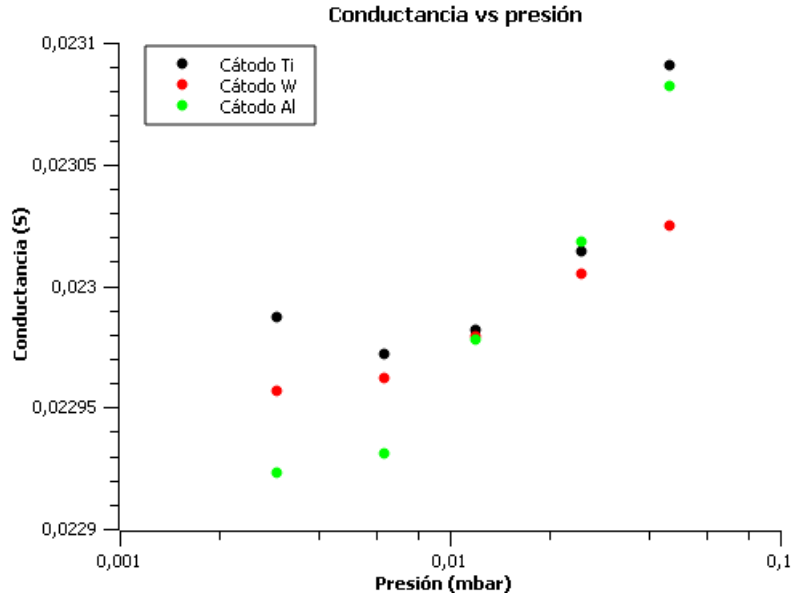
dependen de la potencia y de la presión, sin embargo para diferentes blancos obtenemos otros colores. Que observemos otros colores de plasma no debería ser intuitivo ya que la cantidad de átomos extraídos que produjesen una emisión no debería ser comparable con la de átomos en el plasma, luego se debe de tratar de transiciones con mucha eficiencia de emisión. Existen técnicas de caracterización del plasma mediante el estudio éstas emisiones, como es diagnóstico óptica, la cual no se ha llevado a cabo en este trabajo por falta de tiempo.

La diferencia más significativa para los tres cátodos en cuanto a la capacidad del plasma puede estar en la permitividad del plasma, al tener diferentes permitividades los átomos arrancados de los blancos.

Otra posible explicación para diferenciar los tres blancos es que para una misma presión los tres blancos tienen un tamaño distinto de la zona oscura, ya que los átomos arrancados del plasma tienen un distinto recorrido libre medio al cambiar sus secciones eficaces de colisión. Los resultados nos sugerirían que el Wolframio tiene una sección eficaz de colisión menor, debido a su mayor diferencia de masa atómica con el Argón.

En cuanto a la conductancia del plasma obtenemos los resultados que aparecen en la figura 3.3. Vemos que los valores permanecen constantes, con un incremento relativo menor al 1 %. Parece que tiene una tendencia creciente con la presión que estaría de acuerdo con la referencia

[13], pero no se puede tener en cuenta. Tampoco se aprecia una diferencia sustancial entre los diferentes blancos.

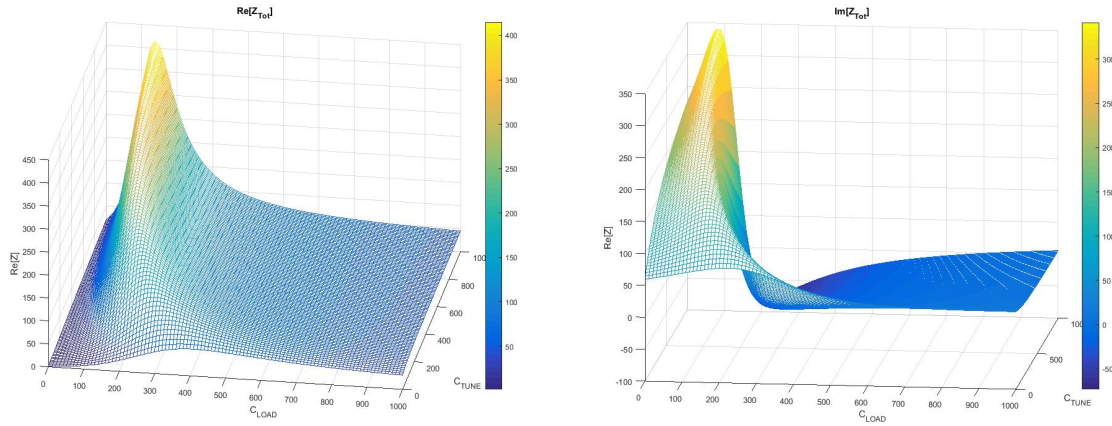


**Figura 3.3:** Conductancia del plasma en función de la presión.

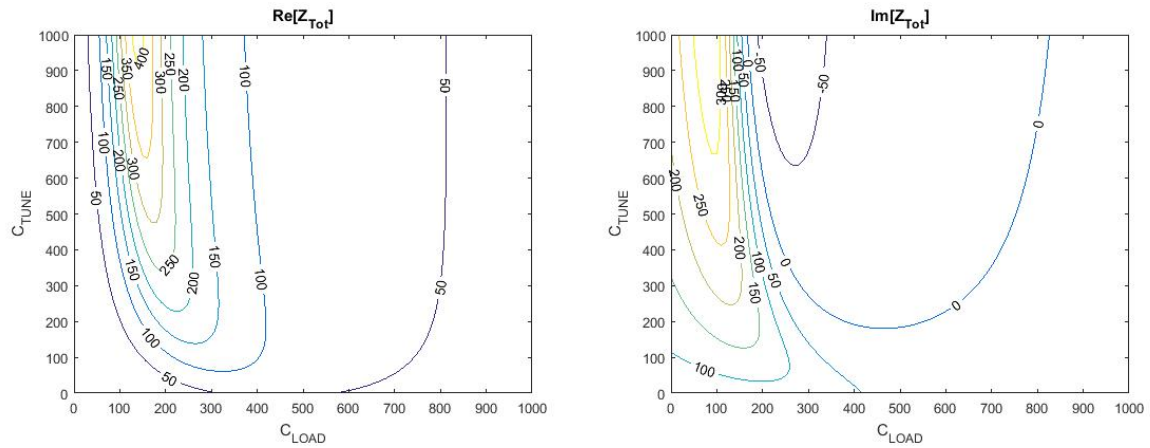
A continuación se presentan los resultados de una simulación de la evolución de la impedancia total a la salida de la red de acoplo en función de los valores que tomen  $C1$  y  $C2$  (directamente relacionados con las capacidades de las ramas *TUNE* y *LOAD*). Para esta simulación hemos utilizado la ecuación 2.4. Los condensadores variables de la red de acoplo nos permiten variar entre 0 y 1000, significando un cambio en  $C1$  entre 0 y 253 pF y en  $C2$  entre 0 y 280 pF. Para la simulación variamos sus valores entre 0 y 1000, pues es el rango que tienen, y a esas variables las denominamos como  $C_{TUNE}$  para el caso de  $C1$  y  $C_{LOAD}$  para  $C2$ .

Si representamos la parte real y la imaginaria en función de las variables  $C_{TUNE}$  y  $C_{LOAD}$  para el valor de impedancia del plasma calculado anteriormente obtenemos figuras como las que aparecen en 3.4.

Las figuras que obtenemos no son nada sencillas, y analizarlas es complicado. Hay que recordar que las impedancias del sistema estarán totalmente adaptadas cuando la parte real de la impedancia total calculada sea  $50 \Omega$  y simultáneamente la parte imaginaria se anule. Para ayudarnos a ver gráficamente cuándo ocurre eso representamos las curvas de nivel de las figuras anteriores. Esas curvas de nivel aparecen en la figura 3.5.

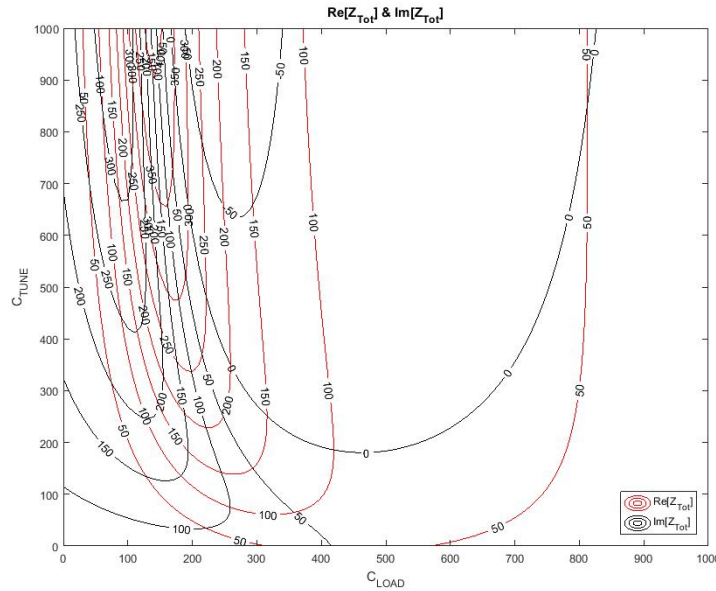


**Figura 3.4:** Impedancia a la salida de la fuente en función de los valores de  $C_{TUNE}$  y  $C_{LOAD}$  para un plasma en el cátodo de Al a  $3 \cdot 10^{-3}$  mbar. Está representada la parte real a la izquierda y la parte imaginaria a la derecha. Los valores de la impedancia del plasma en este caso eran:  $C_P = 360$  pF y  $G_P = 0,0229$  S.



**Figura 3.5:** Curvas de nivel de la impedancia a la salida de la fuente en función de los valores de  $C_{TUNE}$  y  $C_{LOAD}$  para un plasma en el cátodo de Al a  $3 \cdot 10^{-3}$  mbar. Está representada la parte real a la izquierda y la parte imaginaria a la derecha. Los valores de la impedancia del plasma en este caso eran:  $C_P = 360$  pF y  $G_P = 0,0229$  S.

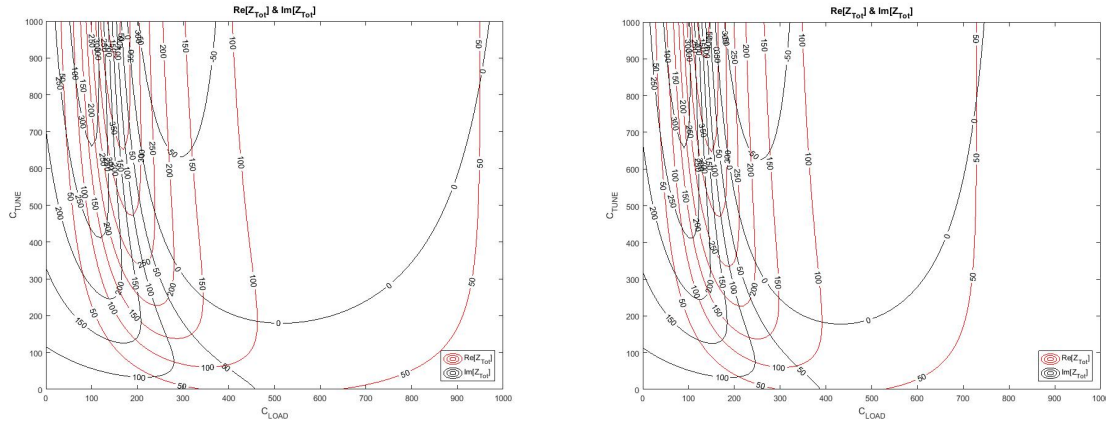
Si representamos en una misma gráfica las curvas de nivel de la parte real y de la parte imaginaria podemos ver los valores para los que tenemos las impedancias del sistema perfectamente acopladas. Los resultados aparecen en la figura 3.6.



**Figura 3.6:** Curvas de nivel de la impedancia a la salida de la fuente en función de los valores de  $C_{TUNE}$  y  $C_{LOAD}$  para un plasma en el cátodo de Al a  $3 \cdot 10^{-3}$  mbar. Parte real en rojo y parte imaginaria en negro.

Vemos que solamente aparece un mínimo para la potencia reflejada, que es cuando se cortan la curva de nivel de  $50 \Omega$  de la parte real (rojo) y la curva de nivel de 0 de la parte imaginaria (negro). Los valores de  $C_{TUNE}$  y  $C_{LOAD}$  son 857 y 813 respectivamente, que son los valores que habíamos empleado durante el proceso para que el plasma estuviese adaptado. Al alejarnos en cualquier dirección de esos valores aparece potencia reflejada hacia la fuente de radiofrecuencia.

Si repetimos la simulación para los plasmas que presentaban la mayor y la menor capacidad (figura 3.7) obtenemos que los valores de  $C_{TUNE}$  y  $C_{LOAD}$  cambian desde 832 hasta 793 para  $C_{TUNE}$  y desde 949 hasta 729 para el  $C_{LOAD}$ . En el caso del  $C_{LOAD}$  esos valores son los valores máximo y mínimo que obtuvimos de todos los procesos. No ocurre lo mismo para el  $C_{TUNE}$ . Teniendo esto en cuenta y observando la figura 3.7 da la sensación de que la rama *LOAD* es un ajuste grueso para adaptar las impedancias y que la rama *TUNE* corresponde a un ajuste fino. Este efecto también se ha observado experimentalmente.

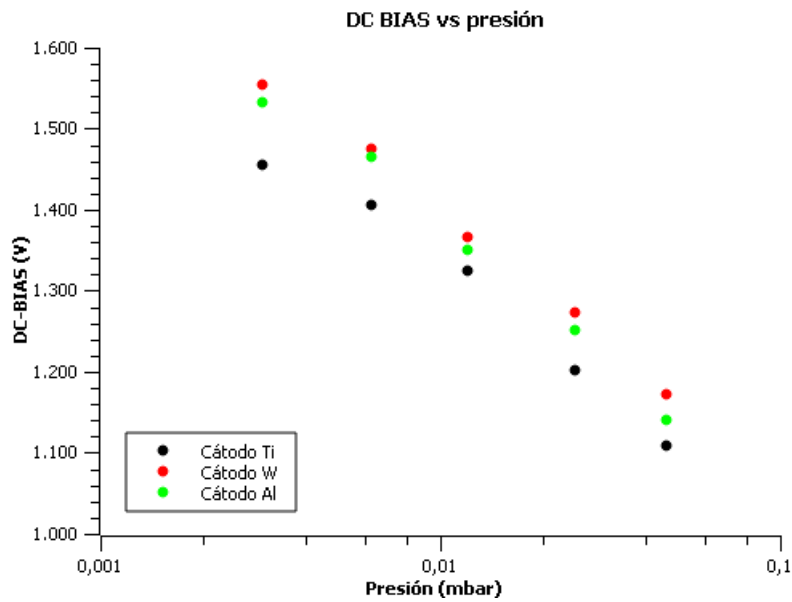


**Figura 3.7:** Curvas de nivel de la impedancia a la salida de la fuente en función de los valores de  $C_{TUNE}$  y  $C_{LOAD}$  para dos plasmas: (izquierda) cátodo de W a  $3 \cdot 10^{-3}$  mbar, (derecha) cátodo de Ti a  $2,5 \cdot 10^{-2}$  mbar.

### 3.1.2 Significación y medida del *DC-BIAS*

El concepto de *DC-BIAS* en radiofrecuencia está lejos de ser sencillo. Se ha descrito en la sección 2.2 y en este capítulo se le intentará dar un sentido con el resto de parámetros eléctricos en un plasma.

Los resultados del valor del *DC-BIAS* en función de la presión para los tres cátodos aparece en la figura 3.8.



**Figura 3.8:** DC-BIAS en función de la presión para los cátodos de Ti, W y Al.

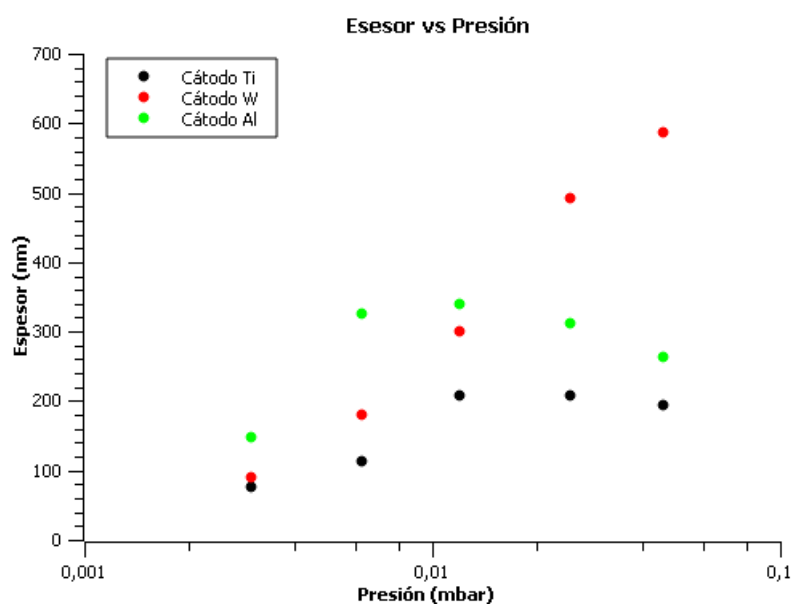


Como podemos observar el valor del *DC-BIAS* decrece con una tendencia lineal a medida que aumentamos exponencialmente la presión. La explicación de éste fenómeno es la siguiente: a medida que la presión aumenta aumenta la concentración de átomos, iones y electrones en el plasma; al aumentar el número de iones y electrones la corriente es mayor y, puesto que la potencia a la que trabajamos es constante (100 W) éste aumento de corriente se ve reflejado en una disminución de la tensión, es decir, en una disminución del *DC-BIAS*.

## 3.2 Espesores de las láminas depositadas

Una vez tenemos una visión global de las características eléctricas del plasma podemos pasar a estudiar el parámetro principal para la caracterización del sistema: el espesor depositado.

Recordamos que el proceso de depósito para todas las muestras era a 100 W de potencia y de una duración de 45 minutos. Los resultados de los espesores depositados medidos con el perfilómetro de contacto en función de la presión aparecen en la figura 3.9.



**Figura 3.9:** Espesores depositados en función de la presión. Éstos espesores han sido mediante perfilometría de contacto.

El análisis del espesor depositado en función de la presión tampoco es algo sencillo, pues hay multitud de variables que le afectan. En primer lugar observamos que para los tres blancos, para el rango de presiones más bajo estudiado, a medida que subimos la presión aumenta el

espesor de la lámina depositada. Esto puede explicarse si consideramos que existe un mayor número de iones bombardeando el material, luego tenemos un mayor rendimiento de extracción. Sin embargo, para los blancos de Al y Ti alcanzamos un valor de la presión a partir del cual no aumenta el espesor de la capa depositada. Que no aumente el espesor de la capa depositada no quiere decir que exista un menor rendimiento de extracción, pues tenemos que recordar que para que se deposite una capa en el sustrato tenemos dos etapas adicionales a la etapa de extracción de material del blanco, como son el transporte a lo largo del plasma y la nucleación. A la hora de que se deposite una capa según aumentamos la presión compiten varios efectos, por un lado tenemos el comentado anteriormente, que según se aumenta la presión la velocidad de extracción es mayor; sin embargo, al aumentar la presión también aparece una mayor densidad de átomos entre el cátodo y el sustrato, luego los recorridos libres medios de los elementos en el mismo son mucho menores, haciendo que los átomos colisionen unos con otros dando lugar a un transporte mucho menos direccional, resultando en que llegan menos átomos al sustrato. Además, al variar la presión también modificamos la energía de los átomos que llegan al sustrato, luego su nucleación será diferente. También tenemos que considerar otro efecto, que es el de pulverización al sustrato (*re-sputtering*). La polaridad del plasma en la región donde no es zona oscura se considera neutro, pero en realidad tiene una ligera polaridad positiva, haciendo que el plasma adquiera una polarización positiva respecto al sustrato, aunque mucho menor que la del cátodo. Ésta diferencia de polarización es la que da lugar a una pequeña pulverización del sustrato que debemos tener en cuenta.

Una posible explicación para que el espesor del Wolframio no siga aumentando al alcanzar cierta presión puede ser que los átomos de W arrancados, al tener una masa atómica mucho mayor que los átomos del plasma, no se vean tan afectados a la hora de alcanzar el sustrato. Es decir, que su sección eficaz de colisión es mucho menor y por lo tanto sufren una dispersión menor. Éste efecto también observamos que podía ser una explicación para la diferencia de la capacidad del plasma respecto a los otros dos blancos, asumiendo que la capacidad del plasma depende esencialmente de la zona oscura.

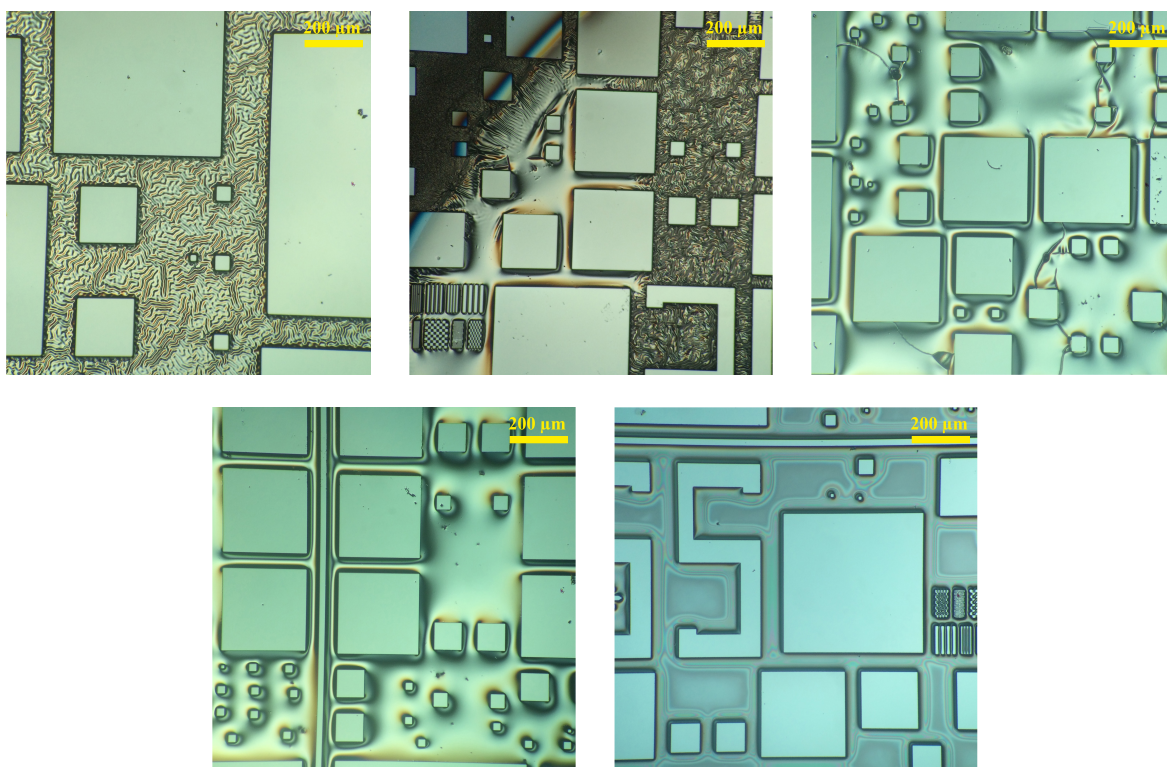
Como podemos ver, el análisis de cualquier magnitud medida en un sistema físico puede ser extremadamente complicada, pues siempre existen diferentes variables que están involucradas,

y normalmente variar una de ellas hace que se modifiquen todas las demás.

### 3.3 Análisis cualitativo de las láminas depositadas

Como se ha podido ver en las anteriores secciones, la caracterización de los diferentes procesos involucra demasiados factores. En esta sección presentaremos una serie de imágenes tomadas mediante un microscopio de las muestras justo después de realizar el proceso de pulverización, como la imagen que aparece en la figura 2.9 (centro).

En primer lugar mostramos las imágenes para las muestras con depósito de titanio a las diferentes presiones de trabajo habituales (figura 3.10).



**Figura 3.10:** Imágenes tomadas con un microscopio de 12,5 aumentos. Las imágenes (de izquierda a derecha y de arriba a abajo) corresponden a muestras sobre las que se ha realizado un depósito de **titanio** a las presiones:  $3 \cdot 10^{-3}$  mbar,  $6,3 \cdot 10^{-3}$  mbar,  $1,2 \cdot 10^{-2}$  mbar,  $2,5 \cdot 10^{-2}$  mbar y  $4,6 \cdot 10^{-3}$  mbar.

Podemos observar que para todas ellas el depósito sobre silicio (en los cuadrados) es muy uniforme, sin mostrar señales evidentes de rugosidad. En la sección 3.2 se vio que el espesor de la lámina depositada era parecido para las tres presiones más altas, aunque en estas imágenes no

es posible distinguir espesores puesto que la vista es cenital. Observamos que lo que claramente sufre una evolución a medida que aumentamos la potencia es la capa depositada sobre materia fororresistente. Esa capa parece que es menos rugosa a medida que aumentamos la presión, sin embargo, ésta capa no es de interés para nuestro estudio.

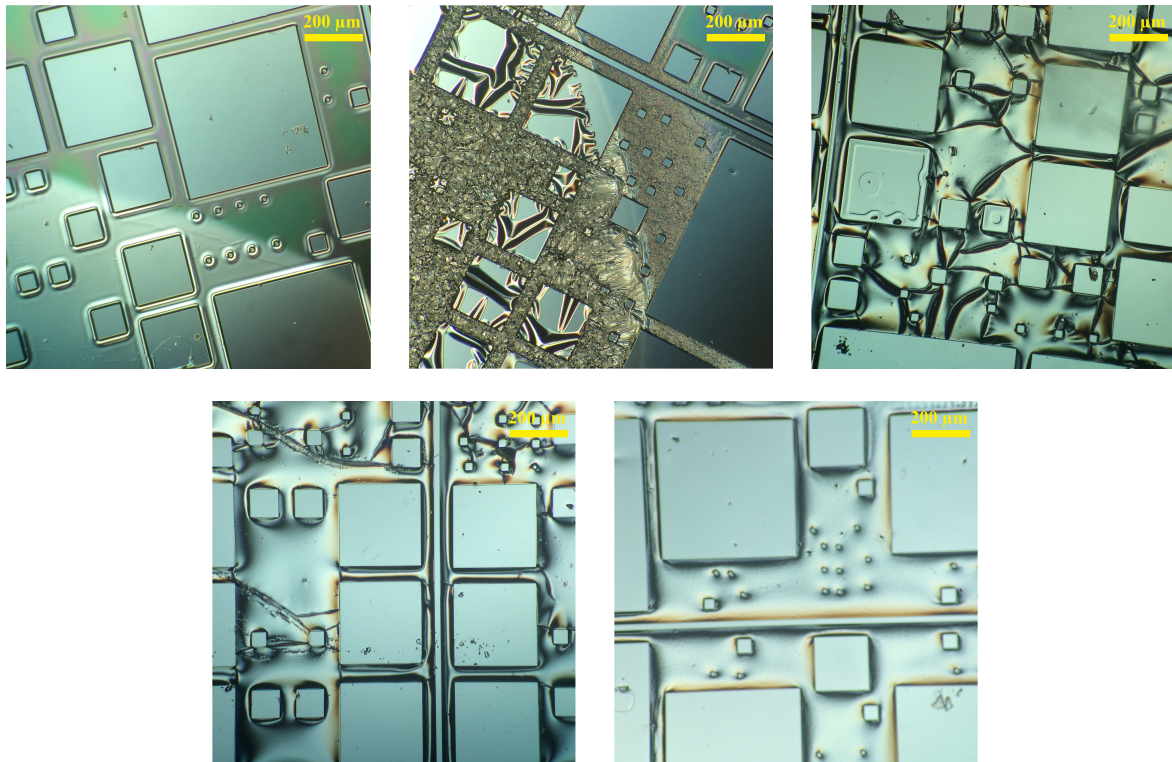
En las imágenes para las presiones de  $6,3 \cdot 10^{-3}$  y  $4,6 \cdot 10^{-2}$  mbar se pueden diferenciar perfectamente los motivos de precisión de la máscara de litografía. Esos motivos tienen  $100 \mu m$  de largo y unas pocas micras de ancho, y se pueden apreciar perfectamente, con aumentos mayores del microscopio podíamos distinguir los motivos más pequeños, lo que significa en una precisión muy alta en el proceso litográfico.

Para los depósitos de wolframio obtenemos las imágenes que aparecen en la figura 3.11. En este caso vemos que para la presión más baja se ha depositado de forma totalmente uniforme tanto en el silicio como en el material fotorresistente. Para la segunda presión más baja ( $6,3 \cdot 10^{-3}$  mbar) observamos que no se ha adherido de forma correcta sobre el silicio. Éste comportamiento solo se ha observado para esta muestra y al hacer el reflotamiento se arrancó casi todo el material depositado, tanto el que estaba sobre el fotorresistente (como es normal) como sobre el silicio. Para el resto de las presiones el depósito sobre el material fotorresistente sigue la tendencia de lo observado con el titanio. Sobre el silicio el depósito es uniforme y con buena adherencia para todas las presiones y, aunque aquí no se aprecia, en la sección 3.2 hemos visto que tenía un crecimiento monótono a medida que aumentábamos la presión.

Por último, para el cátodo de aluminio los depósitos se muestran en la figura 3.12. Para este metal podemos ver que tenemos un depósito uniforme sobre silicio para las cinco presiones de trabajo. Sobre el material fotorresistente ocurre lo mismo que para el cátodo de wolframio. Sin embargo, para este blanco ocurre un nuevo efecto, y crítico en nuestro caso: para todas las presiones exceptuando la más baja la capa de material depositada es rugosa.

En varias imágenes se observa una frontera circular que separa dos regiones, las regiones interiores corresponden a zonas donde se deposita material. Esto es debido a que para sujetar las muestras en el portamuestras ha sido necesario colocar sobre ellas una máscara metálica con aperturas circulares.

Volviendo a la muestra en la que se adhiere de una forma no uniforme la capa de wolframio

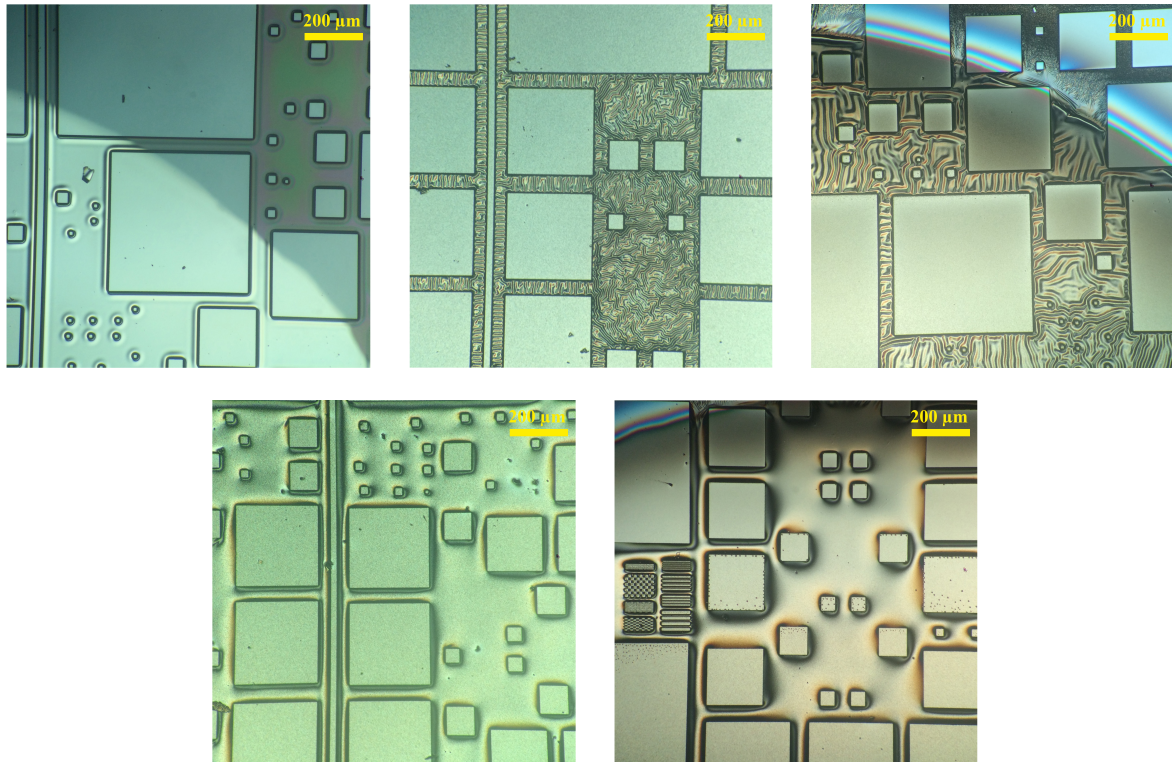


**Figura 3.11:** Imágenes tomadas con un microscopio de 12,5 aumentos. Las imágenes (de izquierda a derecha y de arriba a abajo) corresponden a muestras sobre las que se ha realizado un depósito de **wolframio** a las presiones:  $3 \cdot 10^{-3}$  mbar,  $6,3 \cdot 10^{-3}$  mbar,  $1,2 \cdot 10^{-2}$  mbar,  $2,5 \cdot 10^{-2}$  mbar y  $4,6 \cdot 10^{-3}$  mbar.

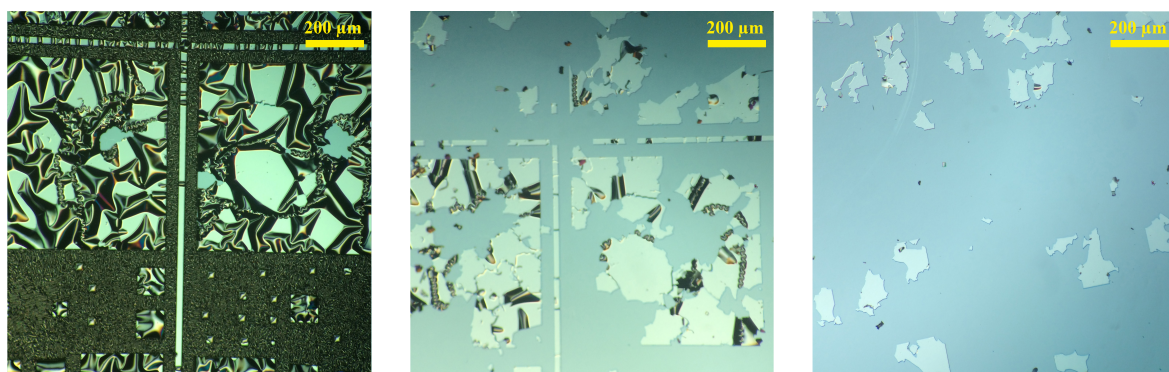
sobre el silicio, decidimos repetir el proceso con otra muestra para descartar que fuese por un tema de limpieza o algún parámetro externo que no se hubiese controlado. Repetimos el proceso con el cátodo de wolframio para una presión de  $6,3 \cdot 10^{-3}$  mbar y obtuvimos exactamente los mismos resultados. En la figura 3.13 se puede observar que no se adhiere uniformemente y que al hacer el reflowtamiento arrancamos casi todo el material.

Por último, debemos darle importancia a que el aluminio depositado sea rugoso. Los contactos metálicos de los dispositivos que se fabriquen van a tener que ser soldados mediante una microsoldadora de ultrasonidos para poder utilizar los dispositivos. En la microsoldadora no se pueden realizar contactos sobre depósitos rugosos, luego estos depósitos no serían válidos para futuros dispositivos. Para las obleas de silicio tipo p no son válidos, ya que solo se necesita un depósito de aluminio sobre silicio para los contactos eléctricos. Sin embargo, para las obleas de silicio tipo n no se sabe, ya que el aluminio irá sobre una capa de wolframio y no sabemos si en



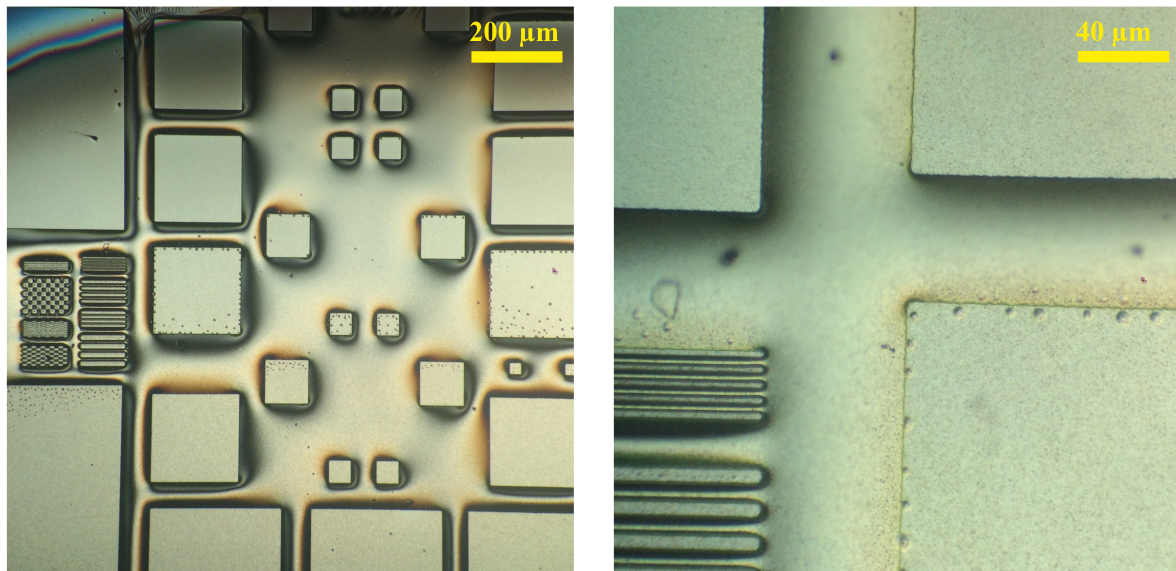


**Figura 3.12:** Imágenes tomadas con un microscopio de 12,5 aumentos. Las imágenes (de izquierda a derecha y de arriba a abajo) corresponden a muestras sobre las que se ha realizado un depósito de **aluminio** a las presiones:  $3 \cdot 10^{-3}$  mbar,  $6,3 \cdot 10^{-3}$  mbar,  $1,2 \cdot 10^{-2}$  mbar,  $2,5 \cdot 10^{-2}$  mbar y  $4,6 \cdot 10^{-3}$  mbar.



**Figura 3.13:** Imágenes tomadas con un microscopio de 12,5 aumentos. Las imágenes (de izquierda a derecha) corresponden a una misma muestra: recién depositada con el blanco de wolframio a  $6,3 \cdot 10^{-3}$  mbar, después del un primer reflowtamamiento con ultrasonidos durante 2 min, después de un segundo reflowtamamiento de otros 2 min.

ese caso se deposita o no rugoso. Podemos ver con más detalle la rugosidad en nuestras muestras en la figura 3.14. También se pueden apreciar unos puntos en los bordes de los cuadrados, que parecen hundidos en la capa como si fuesen poros.



**Figura 3.14:** Imágenes tomadas con un microscopio de 12,5 (izquierda) y 62,5 (derecha) aumentos. Las imágenes corresponden a una misma muestra recién depositada con el blanco de aluminio a  $4,6 \cdot 10^{-2}$  mbar.

Hay que destacar que el espesor del material depositado es de gran interés, mientras que un análisis cualitativo de las capas depositadas habría que valorarlo cuando éstas estuviesen depositadas sobre los materiales adecuados a la hora de fabricar dispositivos. Como podemos apreciar, el depósito depende de la superficie sobre la que se deposita. Por tanto, para estudiar su rugosidad y propiedades físicas habría que depositar wolframio sobre titanio y aluminio sobre wolframio.

# Conclusiones

---

En este trabajo se ha detallado el diseño y montaje de un sistema de pulverización catódica de radiofrecuencia, un sistema de alta complejidad y cuyo correcto funcionamiento recae en una inmensidad de detalles, pues la fabricación microelectrónica requiere de multitud de condiciones. Para poder llevar a cabo una investigación puntera en microelectrónica se requieren equipos que sean adecuados, con una gran precisión y control de su funcionamiento.

El estudio de los materiales de banda intermedia, que es a lo que se dedica el grupo de LDME de la UCM, presenta una dificultad intrínseca a la hora de realizar los contactos. En otras aplicaciones los contactos se recuecen en "forming gas" después del depósito del metal, pero en los materiales de banda intermedia esto no puede hacerse. La razón estaba en que al estar estos fabricados fuera del equilibrio, cualquier aporte térmico puede alterarlos. Al no poder recocer "a posteriori" la técnica de depósito por evaporación es de dudoso resultado y por lo tanto se desarrolla este sistema de pulverización.

Se ha puesto de manifiesto que el sistema funciona correctamente y se ha calibrado la velocidad de crecimiento de láminas para tres metales diferentes, pues tenemos los espesores depositados y el tiempo que hemos empleado en ello. Sin embargo, para un estudio sobre la calidad del material depositado y su rendimiento para realizar contactos eléctricos, que es su finalidad, se requiere otro tipo de estudios diferentes, principalmente mediante medidas eléctricas y de composición.

Hemos observado que la calibración de un sistema de esta magnitud requiere de gran cantidad de experimentos, y por ello propongo una serie de trabajos futuros que serían interesantes de llevar a cabo. En primer lugar sería interesante realizar un estudio de espesor depositado en función de la potencia, ya que el rendimiento de pulverización es muy dependiente de la misma.



También es necesario un estudio de pulverización sobre el sustrato, estudiando la cantidad de material pulverizado para diferentes materiales que suelen conformar los sustratos; los típicos serían silicio y óxido de silicio, ya que éste experimento estaría relacionado con la limpieza del sustrato previa al depósito. Por otro lado, para un estudio de los contactos eléctricos propiamente, se proponen trabajos futuros como medidas eléctricas de tipo TLM (*"Transfer length method"*), medidas de Van der Pauw y medidas de resistividad de hoja mediante cuatro puntas. Por último, se podrían hacer medidas de composición de las láminas depositadas, o microscopía electrónica de transmisión (*TEM*) para corroborar el espesor depositado y analizar la interfaz entre las diferentes capas. Las medidas eléctricas se deberían realizar también sobre muestras con los tres metales depositados de una forma apilada e ir variando parámetros como el espesor de los mismos para obtener la configuración con la que se realiza un contacto óhmico y de menor resistencia.

# Bibliografía

---

- [1] S. Wolf, *Microchip manufacturing*. Lattice press Sunset Beach, California, 2004.
- [2] J. Venables, G. Spiller, and M. Hanbucken, “Nucleation and growth of thin films,” *Reports on Progress in Physics*, vol. 47, no. 4, p. 399, 1984.
- [3] R. W. Vook, “Nucleation and growth of thin films,” *Optical Engineering*, vol. 23, no. 3, pp. 343–349, 1984.
- [4] K. Oura, V. Lifshits, A. Saranin, A. Zotov, and M. Katayama, *Surface science: an introduction*. Springer Science & Business Media, 2013.
- [5] <http://www.globalsino.com/micro/1/1micro9794.html>, may 2018.
- [6] J. L. Vossen and W. Kern, *Thin Film Processes II*, vol. 2. Gulf Professional Publishing, 1991.
- [7] H. C. Card, “Aluminum—silicon schottky barriers and ohmic contacts in integrated circuits,” *IEEE Transactions on Electron Devices*, vol. 23, no. 6, pp. 538–544, 1976.
- [8] M. Finetti, P. Ostoja, S. Solmi, and G. Soncini, “Aluminum-silicon ohmic contact on ‘shallow’ n+/p junctions,” *Solid State Electronics*, vol. 23, pp. 255–257, 1980.
- [9] C. Ting and M. Wittmer, “The use of titanium-based contact barrier layers in silicon technology,” *Thin Solid Films*, vol. 96, no. 4, pp. 327–345, 1982.
- [10] Y. Yamamura and H. Tawara, “Energy dependence of ion-induced sputtering yields from monatomic solids at normal incidence,” *Atomic data and nuclear data tables*, vol. 62, no. 2, pp. 149–253, 1996.

- [11] <https://www.iap.tuwien.ac.at/www/surface/sputteryield>, may 2018.
- [12] N. Matsunami, “Energy dependence of the yields of ion-induced sputtering of monatomic solids,” *Inst. of Plasma Phys.*, 1983.
- [13] J. Logan, N. Mazza, and P. Davidse, “Electrical characterization of radio-frequency sputtering gas discharge,” *Journal of Vacuum Science and Technology*, vol. 6, no. 1, pp. 120–123, 1969.



## **Perfilómetro Sloan Dektak 900050**

Digitalización y guía de uso mediante el programa LabVIEW y la tarjeta DAQ NI USB-6009

**Autor:**

**Daniel Caudevilla Gutiérrez**

Facultad de Ciencias Físicas

Departamento de Física Aplicada III

Grupo de Láminas Delgadas y Microelectrónica

Universidad Complutense de Madrid

Mayo de 2017

## A.1 El perfilómetro

El perfilómetro Dektak se compone básicamente de dos módulos, el primero y más importante es el perfilómetro en sí, el cual se puede ver en la Figura A.1. El segundo módulo es un trazador mediante el cual se puede pintar en papel el perfil de las medidas tomadas, en este gui3n prescindiremos de este segundo m3dulo, pues digitalizaremos las medidas mediante LabView. Sin embargo, el funcionamiento del perfil3metro es el mismo sea cual sea el m3dulo que est3 conectado para la adquisici3n de datos.

En esta primera secci3n aprenderemos a manejar el perfil3metro independientemente de qu3 sistema est3 conectado a el para la toma de datos.



**Figura A.1:** Perfil3metro Sloan Dektak 900050.

### A.1.1 Componentes del perfil3metro

El perfil3metro consta de tres bloques distintos:

- En la parte central del m3dulo se encuentra el portamuestras, el sistema de la aguja que recorre el perfil y un microscopio. El portamuestras permite el desplazamiento en una

dirección y también permite cambiar su inclinación.

La inclinación se varía con la rueda que tiene situada en la parte inferior del portamuestras. También tiene situados unos topes en la parte lateral derecha del portamuestras para limitar la dimensión a recorrer en la medida.

El microscopio está enfocado directamente a la posición de la punta cuando ésta se encuentra en su posición de origen, la cual corresponde a la punta en contacto y la interpretación de punto medio me la altura que se puede medir. La altura de la aguja se ajusta con cualquiera de las ruedas que están situadas en la parte superior del módulo central (para el ajuste grueso) y con la rueda del módulo de la izquierda (ajuste fino).

- El segundo bloque es el situado en la parte superior izquierda del aparato. En éste se encuentra una rueda para el ajuste fino de la altura de la aguja y una serie de botones. Los botones nos permiten cambiar entre las diferentes escalas de las que disponemos para la medida, escala que dependerá de la precisión que busquemos en nuestra medición y del tamaño de lo que queramos medir.

Las escalas van desde  $1\text{M}\text{\AA}$  (1 mm) hasta 1k (1  $\mu\text{m}$ ). Lo que indican las escalas es que en ese rango va a poder medir el perfil de forma precisa, y sería el rango que pintaba en el papel cuando se conectaba el módulo del trazador. En realidad lo que hace es dar una señal analógica a la salida que va desde -50 mV hasta 50 mV, que será lo que recojamos con el programa de LabView.

- En el bloque de la parte superior derecha tenemos una serie de botones que controlan el encendido del perfilómetro (ON y OFF), la luz del microscopio (LAMP) Y la velocidad de movimiento del portamuestras en la dirección que va desde el aparato hacia el usuario. Tiene tres velocidades expresadas en cm/min y un botón de velocidad cero, aunque también se puede mover manualmente con la rueda situada a la derecha (manual speed)<sup>1</sup>.

---

<sup>1</sup>Se recomienda utilizar una de las velocidades predeterminadas cuando se quieran recoger y guardar datos de

### A.1.2 Medicción con el perfilómetro

A continuación se explican los pasos para medir con el perfilómetro independientemente del módulo de recopilación de datos que tenga conectado.

1. En primer lugar asegúrese de que las ruedas están en la posición 0, la escala en 1M y la velocidad en OFF.
2. Encienda el aparato (ON) y la lámpara (LAMP)
3. Coloque la muestra a medir en el portamuestras y desplace el portamuestras mediante la rueda de *manualspeed* hasta que se encuentre debajo de la aguja. Importante haberse cerciorado de que la aguja se encuentra por encima del nivel de la muestra.
4. A continuación, baje la posición de la punta mediante las ruedas que se encuentran en el módulo central hasta que haga contacto con la muestra, y continúe bajando hasta que en el indicador que esté conectado al perfilómetro se encuentre en el centro de la escala<sup>2</sup>.
5. Hasta ahora debería estar seleccionada la escala de 1 M, una vez tenemos la aguja en su posición cero, puede cambiar de escala a la que se desee y repetir el punto 4. Se recomienda ir bajando de escala poco a poco para no perder el punto cero<sup>3</sup>.
6. Una vez está ajustada la escala diríjase a la zona que desea medir y apague la lámpara, ya que esta podría calentar la muestra y hacer que se dilate.
7. Ya puede empezar a medir desplazándose mediante las velocidades predeterminadas o con la velocidad manual. Si necesita cambiar la inclinación de la muestra se hace con la rueda situada en la parte inferior del portamuestras.
8. Cuando haya acabado las medidas, levante la punta, saque la muestra, y deje todos los botones en OFF, las ruedas en la posición cero y la escala en 1M, tal y como lo debería haber encontrado.

---

un perfil

<sup>2</sup>Esta posición cero será el centro del papel si lo que se usa es el trazador o será el cero si se usa el programa de LabVIEW, el cual corresponde a 0 V

<sup>3</sup>Puede haber saltos bruscos cuando se usa la tarjeta debido a problemas de impedancias resultantes de su forma de tomar los datos

## A.2 Programa de adquisición de datos

En esta sección se explica como tomar los datos proporcionados por el perfilómetro.

### A.2.1 Panel frontal

Una vez iniciado el programa, aparecerá el panel frontal como se muestra en la Figura A.2. Asegúrese de que está la tarjeta conectada mediante el puerto USB. En el panel frontal podemos distinguir diferentes elementos y botones, los cuales presentamos a continuación:

- **1:** Monitor con el resultado del perfil expresado en unidades dimensionales (en metros) en el eje vertical, en función del tiempo.
- **2:** Indicador luminoso cuando nos salimos del rango de medida.
- **3:** Monitor e indicador del voltaje medido limitado entre -50 mV y 50 mV. El indicador de la derecha simula la posición que tendría el lápiz si usásemos el trazador. Estos datos ya han sido filtrados.
- **4:** Panel para determinar la escala y que pueda hacer la conversión a unidades métricas. Ésta tendrá que coincidir con la escala seleccionada en el perfilómetro.
- **5:** Botón de stop del programa (hay otro situado en la barra de herramientas).
- **6:** Opciones para el guardado de datos
- **7:** Opciones para la adquisición de datos mediante la tarjeta. Se puede elegir la frecuencia (muestras tomadas por segundo) y el número de muestras que toma por tanda<sup>4</sup>. Se recomienda una frecuencia de 1000 Hz y un número de muestras de 100, de tal forma que puede ir filtrando 100 puntos y, por consiguiente, trazando cada décima de segundo.
- **8:** Monitor e indicadores de los datos de voltaje tomados, antes de ser filtrados.
- **9:** Monitor e indicadores de los datos tomados una vez filtrados

---

<sup>4</sup>Para una mejor comprensión diríjase al Apéndice A.3.



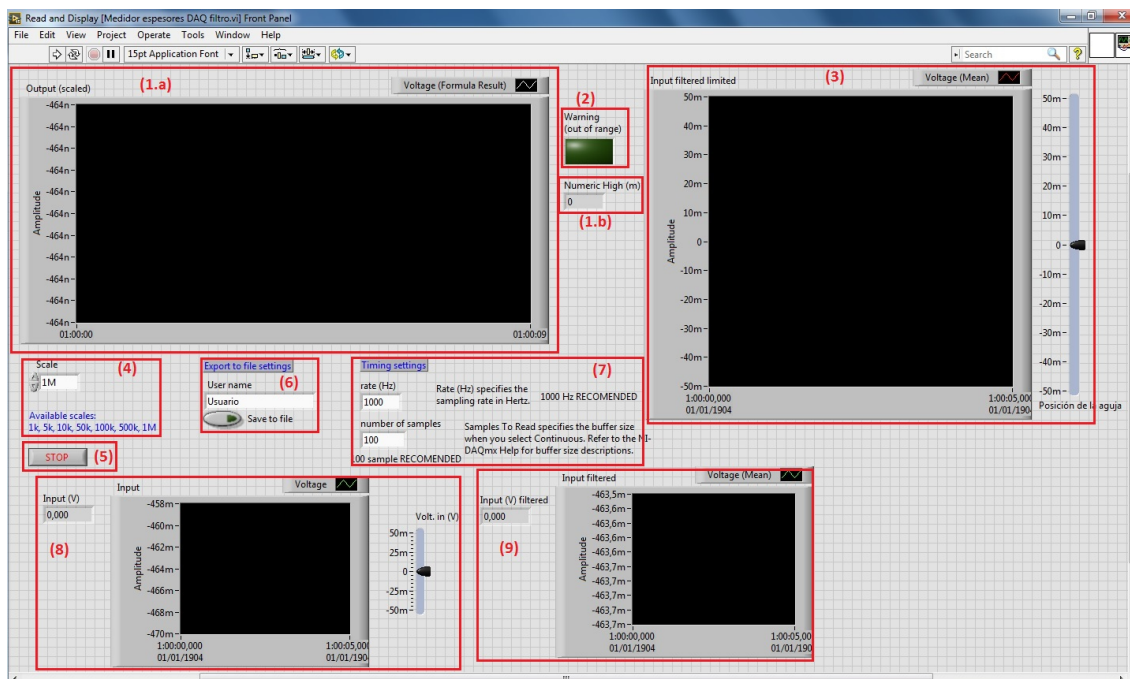


Figura A.2: Panel Frontal del programa *Medidor espesores DAQ filtro*.

## A.2.2 Funcionamiento del programa

El programa toma datos con una frecuencia que podemos variar desde el Panel Frontal, una vez tomados los representa y los conduce a un filtro que lo que hace es tomar una serie de puntos<sup>5</sup> y realizar una media de ellos, resultando un único valor, y así reducir las fluctuaciones en la medida en un orden  $\sqrt{N}$ , donde  $N$  es el numero de datos tomados.

Una vez tenemos los datos filtrados, el programa los representa de dos formas distintas, en un monitor con la escala fija y en otro con la escala autorregulable.

Esos datos de voltaje los coge y los pasa a datos en metros en función de la escala a la que hayamos medido y hayamos indicado en el Panel Frontal. Esos datos los representa también y, además, los exporta en un fichero en el que aparecerá el nombre de usuario que le hayamos indicado y la fecha de toma de datos en el formato YYYYMMDD. Los datos exportados aparecen en un fichero *.lvm* y aparecen las medidas en función de un tiempo absoluto (en segundos)

<sup>5</sup>El filtro toma 100 puntos por defecto, pero podemos cambiar ese valor desde el diagrama de bloques

desde que se empezaron a guardar los datos. Para que exporte los datos hay que encender un interruptor que se encuentra debajo de donde se introduce el nombre de usuario, y solo se grabarán mientras éste interruptor esté en verde.

Los datos guardados aparecerán en la carpeta "C : \Users \ GLMD \ Documents \ LabVIEW Data" y son fáciles de analizar y representar mediante programas como **Microsoft Office Excel** u **Origin**.

### A.3 Toma de datos mediante el programa *Medidor espesores DAQ filtro*

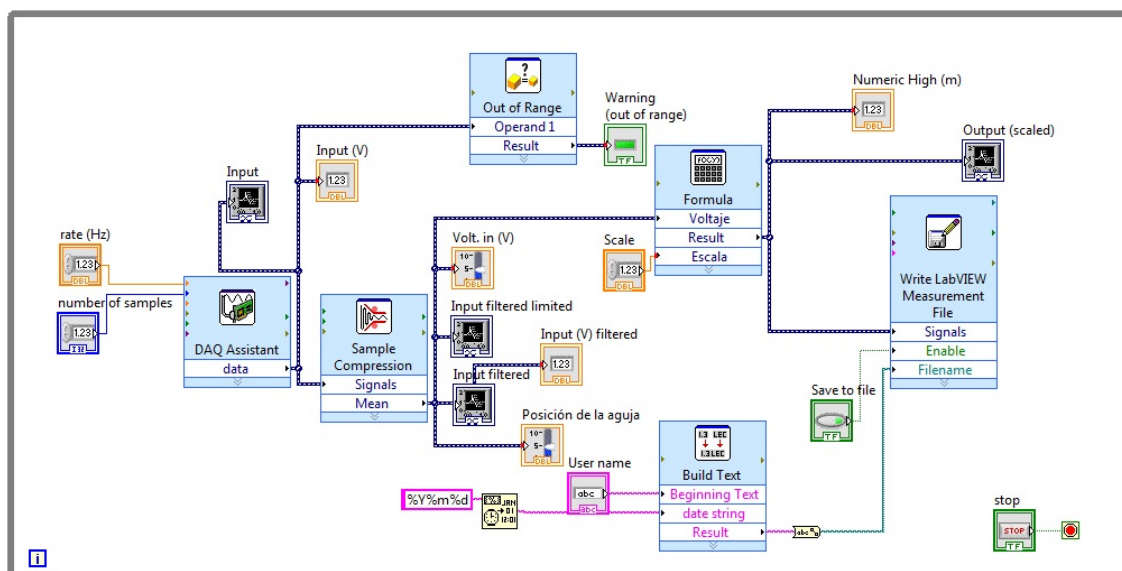
1. En primer lugar abra el programa *Medidor espesores DAQ filtro.vi* y asegúrese de que está la tarjeta DAQ NI USB-6009 conectada al puerto USB. Encienda también el perfilómetro.
2. Seleccione la escala de 1M en el Panel Frontal [Figura A.2 (4)].
3. Seleccione la frecuencia de muestreo y el numero de muestras en cada medición [Figura A.2 (7)]. Se recomienda 1000 Hz y 100 muestras.
4. Introduzca su nombre de usuario con el que se guardarán todos los archivos que quiera guardar [Figura A.2 (6)].
5. Ejecute el programa (Operate → Run, presione Ctrl+R o pinche en la flecha blanca en la barra de Herramientas). En ese momento debería ver la señal medida en los monitores.
6. **Una vez tiene monitorizada la señal del perfilómetro, siga las instrucciones de funcionamiento del perfilómetro (Sección A.1.2). Es importante no haber bajado la punta antes de este punto, ya que no hubiese estado monitorizado y podríamos haber dañado la muestra y el sistema de medida.**
7. Cuando quiera empezar a guardar un perfil, encienda el interruptor "Save to file"[Figura A.2 (6)]. ¡Aviso! Solamente se exportan datos a un archivo mientras éste interruptor está

encendido, no pudiendo exportar datos visualizados en la pantalla anteriormente. No pasa nada por guardar varias series de datos con el mismo nombre de usuario, pues los archivos se copian cambiando el nombre, no se sobrescriben.

8. Una vez se quiera parar de monitorizar el perfilómetro detenga el programa en el botón de *STOP* [Figura A.2 (5)] o en la barra de Herramientas y siga los pasos de la sección 1.2 para apagar el perfilómetro.

## Diagrama de bloques en LabVIEW

En la Figura A.3 se muestra un esquema interno del funcionamiento del programa



**Figura A.3:** Diagrama de bloques del programa *Medidor espesores DAQ filtro*.

El bloque *DAQ assistant* se encarga de la toma de datos, el cual tiene dos entradas a través de las cuales podemos determinar la frecuencia y el número de muestras. Esos datos se representan de diferentes formas y activan un aviso (*Warning*) en caso de que estén fuera del límite (-50, 50) mV.

Los datos tomados pasan por un filtro *Sample Compression*, el cual actúa de filtro, promediando cada 100 datos entrantes, reduciendo en ruido en un factor 10 teóricamente. El número

de muestras que toma el filtro se puede cambiar desde esta ventana.

Los datos filtrados se representan de diversas formas (gráficos con escalas fijas y auto-irregulables, indicadores...) y después llegan al bloque *Formula*, donde se hace la conversión voltios-metros en función de una entrada que se corresponde con la escala utilizada, la cual seleccionamos desde el panel frontal.

Por último, esos datos en formato métrico se representan en un gráfico y de forma numérica y se exportan a un fichero *.lvm* mediante el bloque *Write LabVIEW Measurement File*. Éste bloque está controlado por una entrada *Enable* en forma de interruptor, con lo que solamente actuará cuando éste interruptor esté encendido. El resto de entradas son para determinar el nombre del archivo exportado, el cual tiene formato de fecha y nombre del usuario que se determina también desde el panel frontal.

## Programa para analizar datos con Mathematica

Los datos exportados por LabVIEW pueden analizarse y representarse mediante multitud de programas, como **Microsoft Office Excel** u **Origin**. En este apéndice se muestra un script de **Mathematica** que puede usarse para representar y corregir los datos tomados por el perfilómetro.

Con este programa se representan los datos tomados tal cual son exportados y también se hace una corrección en el caso en que la muestra estuviese inclinada o se observe una pendiente debida a lo que fuera. El programa corrige automáticamente los datos y también permite establecer una región que se presupone plana para corregir los datos tomando esa región como referencia.

El script en lenguaje de **Mathematica** es el siguiente:

```

UserName = "Username";
DateOfMeasurement = "20170527";
MeasNumber = "0";

EscalaS = InputString["Por favor, especifique la escala sin espacios (1k, 5k, 10k,
50k, 100k, 500k o 1M):"];
EscalaSS = StringReplace[EscalaS, { "k" -> "000", "M" -> "000000" }];
EscalaIn = ToExpression[EscalaSS];
Escala=0; Do[{ Scomp = 100*(10 ^ n)*(1+4*j), If[EscalaIn==Scomp, Escala=EscalaIn,
Escala=Escala], If[EscalaIn==5000000, Escala=0, Escala=Escala] } , { n, 4}, { j, 0, 1}];

(*-----CODE START-----*)

MainPath = "C:/Users/Daniel Caudevilla/Documents/LabVIEW Data/"; (*Cambiar en función
del ordenador que se utilice, se pone la carpeta contenedora de los archivos*)
PlotHTOut = MainPath <>UserName <>"_"<>DateOfMeasurement <>"_"<>MeasNumber <>".Height.jpg";
PlotHTCOut = MainPath <>UserName <>"_"<>DateOfMeasurement <>"_"<>MeasNumber
<>".HeightCorrected.jpg";
PlotHTCBOut = MainPath <>UserName <>"_"<>DateOfMeasurement <>"_"<>MeasNumber
<>".HeightCorrectedMix.jpg";
PlotHTCROut = MainPath <>UserName <>"_"<>DateOfMeasurement <>"_"<>MeasNumber
<>".HeightCorrected2.jpg";
PlotVTOut = MainPath <>UserName <>"_"<>DateOfMeasurement <>"_"<>MeasNumber
<>".Voltaje.jpg";

DataFile = MainPath <>UserName <>"_"<>DateOfMeasurement <>"_"<>MeasNumber <>".lvm";
ImportList = Import[DataFile, "Table"];
ImportList = Drop[ImportList, 23];

Letra=ToString[ImportList];
LetraN = StringReplace[Letra, {"", 0 -> ".0", "1" -> ".1", "2" -> ".2", "3" -> ".3",
"4" -> ".4", "5" -> ".5", "6" -> ".6", "7" -> ".7", "8" -> ".8", "9" -> ".9", "E" ->
"*10 ^ " }];
ImportList=ToExpression[LetraN];

TimeList = ImportList[[All, 1]];
HeightList = ImportList[[All, 2]]*10000000000;
If[Escala!=0, {VList = HeightList*10 ^ 9/Escala, VTList = Table[{TimeList[[j]],
VList[[j]]}, {j, 1, Length[TimeList]}] } , Print["Escala inderetminada"]];

HTList = ImportList.{{1, 0}, {0, 10000000000}};

```

```

(*-----FITTING AND ANALYSIS-----*)

FitFit = LinearModelFit[HTList, x ,x];
HTSquared = FitFit["RSquared"];
HTFitEquation = Normal[FitFit];
ParameterTableHT = FitFit["ParameterTableEntries"];

SlopeHT = ParameterTableHT[[2,1]];
SlopeErrorHT = ParameterTableHT[[2,2]];
InterceptHT = ParameterTableHT[[1,1]];
InterceptErrorHT = ParameterTableHT[[1,2]];

CorrectionList = TimeList*SlopeHT+InterceptHT;
HeightListC = HeightList-CorrectionList;
HTListC = Table[{TimeList[[j]],HeightListC[[j]]},{j,1,Length[TimeList]}};

(*-----PLOTS-----*)

OpenWrite[PlotHTOut];
OpenWrite[PlotHTCOut];

PlotHTd = ListLinePlot[HTList,
ImageSize->Scaled[2],GridLines->Automatic, GridLinesStyle->Directive[Gray,Dashed],
PlotStyle->{Blue,Thickness[0.002]},
Frame->True, FrameLabel->{"Time (s)","Height (m)"},
LabelStyle->Directive[20,Bold,
FontFamily->"GillSansMT"], PlotLabel->Style["Perfil de la medida <>DateOfMeasurement
<>"-<>MeasNumber,25,Bold,
FontFamily->"GillSansMT"]];
FitPlot = Plot[HTFitEquation, {x,0,Max[TimeList]}, PlotStyle->{Lighter[Red],
Thickness[0.001]}];
PlotHT = Show[PlotHTd, FitPlot];
Export[PlotHTOut,PlotHT];
Close[PlotHTOut];

PlotHTC = ListLinePlot[HTListC,
ImageSize->Scaled[2],GridLines->Automatic, GridLinesStyle->Directive[Gray,Dashed],
PlotStyle->{Red,Thickness[0.002]},
Frame->True, FrameLabel->{"Time (s)","Height (m)"},
LabelStyle->Directive[20,Bold,FontFamily->"GillSansMT"],
PlotLabel->Style["Perfil de la medida "<>DateOfMeasurement <>"-<>MeasNumber
<>çorregido",25,Bold,FontFamily->"GillSansMT"]];

```

```

Export[PlotHTCOut,PlotHTC];
Close[PlotHTCOut];

If[Escala!=0,
{OpenWrite[PlotVTOut];
PlotVT = ListLinePlot[VTLList,
ImageSize->Scaled[2],GridLines->Automatic, GridLinesStyle->Directive[Gray,Dashed],
PlotStyle->Thickness[0.002],
Frame->True, FrameLabel->{"Time (s)","Voltaje (V)"},
LabelStyle->Directive[20,Bold,FontFamily->"GillSansMT"],
PlotLabel->Style["Perfil de la medida "<>DateOfMeasurement <>."_"<>MeasNumber <>".Escala
<>EscalaS ,25,Bold,FontFamily->"GillSansMT"]]; Export[PlotVTOut,PlotVT];
Close[PlotVTOut];},Print["Escala inderetminada"]];

(*-----SEGUNDA CORRECCIÓN-----*)

HTListB = Take[HTList,{Position[TimeList,Input["Tiempo inicial de una región que se
supone plana en la muestra
(A veces hay que poner un punto al final del valor)"]][[1]][[1]],
Position[TimeList,Input["Tiempo final de la región que hemos supuesto plana en la muestra
(A veces hay que poner un punto al final del valor)"]][[1]][[1]]]};

FitFitB = LinearModelFit[HTListB, x ,x];
HTSquaredB = FitFitB["RSquared"];
HTFitEquationB = Normal[FitFitB];
ParameterTableHTB = FitFitB["ParameterTableEntries"];

SlopeHTB = ParameterTableHTB[[2,1]];
SlopeErrorHTB = ParameterTableHTB[[2,2]];
InterceptHTB = ParameterTableHTB[[1,1]];
InterceptErrorHTB = ParameterTableHTB[[1,2]];

CorrectionListB = TimeList*SlopeHTB+InterceptHTB;
HeightListCB = HeightList-CorrectionListB;
HTListCB = Table[{TimeList[[j]],HeightListCB[[j]]},{j,1,Length[TimeList]}}];

OpenWrite[PlotHTCROut];
PlotHTCB = ListLinePlot[HTListCB,
ImageSize->Scaled[2],GridLines->Automatic, GridLinesStyle->Directive[Gray,Dashed],
PlotStyle->{Green,Thickness[0.002]},
Frame->True, FrameLabel->{"Time (s)","Height (m)"},
LabelStyle->Directive[20,Bold,FontFamily->"GillSansMT"],

```

```

PlotLabel->Style["Perfil de la medida <>DateOfMeasurement <>_"<>MeasNumber<>
" corregido tomando una referencia",25,Bold,FontFamily->"GillSansMT"]];
Export[PlotHTCROut,PlotHTCB];
Close[PlotHTCROut];

OpenWrite[PlotHTCBOut];
PlotHTAll = ListLinePlot[{HTList,HTListC,HTListCB},
ImageSize->Scaled[2],GridLines->Automatic, GridLinesStyle->Directive[Gray,Dashed],
PlotStyle->{Blue,Red,Green,Thickness[0.002]},
Frame->True, FrameLabel->{"Time (s)","Height (m)"},
LabelStyle->Directive[20,Bold,FontFamily->"GillSansMT"],
PlotLabel->Style["Perfil de la medida <>DateOfMeasurement <>_"<>MeasNumber<>
" corregido",25,Bold,FontFamily->"GillSansMT"]];
FitPlotB = Plot[HTFitEquationB, {x,0,Max[TimeList]},
PlotStyle->{Lighter[Green],Thickness[0.001]}];
PlotHTCorr=Show[PlotHTAll,FitPlotB,FitPlot];
Export[PlotHTCBOut,PlotHTCorr];
Close[PlotHTCBOut];

```



## Uso del perfilómetro Sloan Dektak

1. En primer lugar, comprobar que la escala en el perfilómetro es de 1M, el botón power y las velocidades están en OFF, las ruedas en su posición cero y la punta levantada.
2. Conectar la tarjeta en el puerto USB, abrir el programa *Medidor espesores DAQ filtro.vi*, colocar la muestra en el portamuestras sin apoyar todavía la punta y encender el perfilómetro.
3. Comprobar que en el programa la escala es de 1M, la frecuencia es 1000 Hz y el número de muestras es 100. Ejecutar el programa (▷)
4. Bajar la punta hasta que se vea en los monitores del programa, una vez se observa, seguir bajando hasta que en los monitores marque una posición lo más próxima a cero.
5. A continuación, empezar a mover la muestra en una dirección para observar si ésta está inclinada, y corregirlo con la rueda situada en la parte inferior del portamuestras.
6. Una vez alineada, ir bajando la escala tanto en el perfilómetro como en el programa y repetir los puntos 4 y 5 hasta que alcancemos la escala deseada para nuestra medida.
7. Cuando estemos en la escala deseada y queramos guardar un perfil, nos aseguramos que las escalas del programa y del perfilómetro son las mismas, seleccionamos una velocidad de las predeterminadas (1, 0.1 o 0.01 cm/min), introducimos nuestro nombre de usuario en el programa y hacemos click en el botón *Save to File*.
8. Cuando queramos parar de medir volvemos a hacer click en el botón *Save to File* y apagamos la velocidad. Es importante hacer esto en el orden que se ha descrito porque al pulsar botones (o golpear el aparato) mientras medimos van a aparecer picos en los perfiles fruto de la vibración del aparato.
9. Cuando no queremos hacer más medidas seleccionamos la escala 1M, levantamos la punta hasta estar seguros de que no toca la muestra, apagamos el perfilómetro, extraemos la muestra y comprobamos que todos los botones están como en el punto 1.

10. Por último, detenemos el programa, lo cerramos y extraemos la tarjeta USB. Todas las medidas guardadas aparecen en una carpeta llamada *LabVIEW Data* que se encuentra en *C:/Users/GLDM/Documents/LabVIEW Data/*.